

ISSN 2074-272X

науково-практичний
журнал

2018/5



ЕІЕ електротехніка і **ЕІЕ** електромеханіка

Electrical Engineering

& Electromechanics



Присвячується 100-річчю НАН України

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Електричні машини та апарати

Електротехнічні комплекси та системи.

Силова електроніка

Теоретична електротехніка та електрофізика

Техніка сильних електричних та магнітних полів.

Кабельна техніка

Електричні станції, мережі і системи

Безпека електрообладнання

З 2015 р. журнал індексується у міжнародній

наукометричній базі Web of Science

Core Collection: Emerging Sources

Citation Index



«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видання засновано Національним технічним університетом «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») та Державною установою «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України» (ДУ «ІТПМ НАНУ»)

Журнал засновано у 2002 р.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 21021-10821ПР від 07.10.2014 р.



«ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS»

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Klymenko B.V.	Editor-in-Chief , Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), Ukraine
Sokol Ye.I.	Deputy Editor , Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, Rector of NTU "KhPI", Ukraine
Rozov V.Yu.	Deputy Editor , Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine"(SI "ITPM NASU"), Kharkiv, Ukraine
Batygin Yu.V.	Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine
Bíró O.	Professor, Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz, Austria
Bolyukh V.F.	Professor, NTU "KhPI", Ukraine
Colak I.	Professor, Nisantasi University, Istanbul, Turkey
Doležel I.	Professor, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic
Féliachi M.	Professor, Technological Institute of Saint-Nazaire, University of Nantes, France
Gurevich V.I.	Ph.D., Honorable Professor, Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, Haifa, Israel
Ida N.	Professor, The University of Akron, Ohio, USA
Kildishev A.V.	Associate Research Professor, Purdue University, USA
Kuznetsov B.I.	Professor, SI "ITPM NASU", Ukraine
Kyrylenko O.V.	Professor, Member of NAS of Ukraine, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine (IED of NASU), Kyiv, Ukraine
Nacke B.	Professor, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Institute of Electrotechnology, Hannover, Germany
Podoltsev A.D.	Professor, IED of NASU, Kyiv, Ukraine
Rainin V.E.	Professor, Moscow Power Engineering Institute, Russia
Rezynkina M.M.	Professor, NTU "KhPI", Ukraine
Shkolnik A.A.	Ph.D., Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, member of CIGRE (SC A2 - Transformers), Haifa, Israel
Trichet D.	Professor, Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique, Nantes, France
Yatchev I.	Professor, Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria
Yufarov V.B.	Professor, National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", Ukraine
Zagirnyak M.V.	Professor, Member of NAES of Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskiy National University, Ukraine
Zgraja J.	Professor, Institute of Applied Computer Science, Lodz University of Technology, Poland

НАЦІОНАЛЬНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ*

Клименко Б.В.	головний редактор , професор, НТУ "ХПІ"
Сокол Є.І.	заступник головного редактора , член-кор. НАНУ, ректор НТУ "ХПІ"
Розов В.Ю.	заступник головного редактора , член-кор. НАНУ, директор ДУ "ІТПМ НАНУ"
Гречко О.М.	відповідальний секретар , к.т.н., НТУ "ХПІ"
Баранов М.І.	д.т.н., НДПКи "Молнія" НТУ "ХПІ"
Буряковський С.Г.	професор, директор НДПКи "Молнія" НТУ "ХПІ"
Буткевич О.Ф.	професор, Інститут електродинаміки НАНУ
Василів К.М.	професор, НУ "Львівська Політехніка"
Васьковський Ю.М.	професор, НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"
Гриб О.Г.	професор, НТУ "ХПІ"
Гурин А.Г.	професор, НТУ "ХПІ"
Жемеров Г.Г.	професор, НТУ "ХПІ"
Клепиков В.Б.	професор, НТУ "ХПІ"
Міліх В.І.	професор, НТУ "ХПІ"
Михайлов В.М.	професор, НТУ "ХПІ"
Омельяненко В.І.	професор, НТУ "ХПІ"
Петрушин В.С.	професор, ОНПУ, Одеса
Пуйло Г.В.	професор, ОНПУ, Одеса
Резинкін О.Л.	професор, НТУ "ХПІ"
Сосков А.Г.	професор, ХНУМГ імені О.М. Бекетова
Щербак Я.В.	професор, НТУ "ХПІ"
Ягуп В.Г.	професор, ХНУМГ імені О.М. Бекетова

* Члени національної редакційної колегії працюють у провідних українських наукових, освітніх та дослідницьких установах

NATIONAL EDITORIAL BOARD*

Klymenko B.V.	Editor-in-Chief , Professor, NTU "KhPI"
Sokol Ye.I.	Deputy Editor , Corresponding Member of NAS of Ukraine, Rector of NTU "KhPI"
Rozov V.Yu.	Deputy Editor , Corresponding Member of NAS of Ukraine, Director of SI "ITPM NASU"
Grechko O.M.	Executive Managing Editor , Ph.D., NTU "KhPI"
Baranov M.I.	Dr.Sc. (Eng.), Institute "Molniya" of NTU "KhPI"
Buriakovskiy S.G.	Professor, Director of Institute "Molniya" of NTU "KhPI"
Butkevych O.F.	Professor, IED of NASU
Vasyliv K.M.	Professor, Lviv Polytechnic National University
Vaskovskiy Yu.M.	Professor, NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Gryb O.G.	Professor, NTU "KhPI"
Guryn A.G.	Professor, NTU "KhPI"
Zhemerov G.G.	Professor, NTU "KhPI"
Klepikov V.B.	Professor, NTU "KhPI"
Milykh V.I.	Professor, NTU "KhPI"
Mikhaylov V.M.	Professor, NTU "KhPI"
Omel'yanenko V.I.	Professor, NTU "KhPI"
Petrushin V.S.	Professor, Odessa National Polytechnic University
Puilo G.V.	Professor, Odessa National Polytechnic University
Rezynkin O.L.	Professor, NTU "KhPI"
Soskov A.G.	Professor, O.M. Beketov NUUE in Kharkiv
Shcherbak Ya.V.	Professor, NTU "KhPI"
Yagup V.G.	Professor, O.M. Beketov NUUE in Kharkiv

* Members of National Editorial Board work in leading Ukrainian scientific, educational and research institutions

Адреса редакції / Editorial office address:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна
Dept. of Electrical Apparatus, NTU "KhPI", Kurpychova Str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine

тел. / phone: +380 57 7076281, +380 67 3594696, e-mail: a.m.grechko@gmail.com

ISSN (print) 2074-272X

ISSN (online) 2309-3404

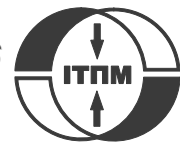
© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2018

© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2018

Підписано до друку 22.10.2018 р. Формат 60 x 90 1/8. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,75.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-05-2018. Ціна договірна.

Надруковано ТОВ "Друкарня "Мадрид", Україна, 61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славенні імена

Баранов М.І., Розов В.Ю., Сокол Є.І. До 100-річчя Національної академії наук України – колиски вітчизняної науки і техніки	3
Золотарев В.М. Завод «Южкабель»: веги путі (75 лет заводу «Южкабель»)	12

Електричні машини та апарати

Болух В.Ф., Кашанский Ю.В., Кочерга А.И., Щукин И.С. Исследование линейного импульсного электро-механического преобразователя индукционного типа с двойным якорем, предназначенного для уничтожения информации на SSD накопителе	17
Васьковський Ю.М., Пода М.В., Кошикар І.В. Електрогенератор в системі рекуперації енергії механічних коливань транспортних засобів	24
Шевченко В.В., Минко А.Н., Строкоус А.В. Анализ электромагнитных вибрационных сил в элементах крепления статора турбогенератора к корпусу при ненормальных режимах работы	29

Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdvi I.V., Voloshko A.V., Vinichenko E.V. Synthes of robust active shielding systems of magnetic field generated by group of high-voltage power lines	34
--	----

Теоретична електротехніка та електрофізика

Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Method for voltage control in charge circuit of electric discharge installations with two capacitors under nonzero initial conditions	39
---	----

Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка

Баранов М.И., Буряковский С.Г., Рудаков С.В. Метрологическое обеспечение в Украине испытаний объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к воздействию импульсов тока (напряжения) искусственной молнии и коммутационных импульсов напряжения	44
Brzhezyskiy V.O., Vendychanskiy R.V., Trotsenko Ye.O., Haran Ya.O., Desyatov O.M., Khominich V.I. Characteristics of specialized single-phase high voltage doubler rectifier	54

Електричні станції, мережі і системи

Dehghani M., Montazeri Z., Ehsanifar A., Seifi A.R., Ebadi M.J., Grechko O.M. Planning of energy carriers based on final energy consumption using dynamic programming and particle swarm optimization	62
---	----

Безпека електрообладнання

Глебов О.Ю., Колишко Д.Г., Колишко Г.М., Еремеева Е.П. К вопросу проектирования заземляющих устройств подстанций 330(220) кВ для обеспечения электромагнитной совместимости вторичных цепей	72
---	----

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Great Events. Famous Names

Baranov M.I., Rozov V.Yu., Sokol E.I. To the 100th anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine – the cradle of domestic science and technology	3
Zolotaryov V.M. Plant «Yuzhcable works»: milestones of the road (75th anniversary of the plant «Yuzhcable works»)	12

Electrical Machines and Apparatus

Bolyukh V.F., Kashanskij Yu.A., Kocherga A.I., Schukin I.S. Investigation of linear pulse electromechanical converter of induction type with double armature intended for destroying information on SSD storage device	17
Vaskovskiy Yu.M., Poda M.V., Koshikar I.V. Electric generator in the recuperation system of the energy from mechanical oscillations in vehicles	24
Shevchenko V.V., Minko A.N., Strokous A.V. Analysis of electromagnetic vibration forces in the elements of the turbogenerator stator fastening to the case in non-nominal operation modes	29

Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdvi I.V., Voloshko A.V., Vinichenko E.V. Synthes of robust active shielding systems of magnetic field generated by group of high-voltage power lines	34
--	----

Theoretical Electrical Engineering and Electrophysics

Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Method for voltage control in charge circuit of electric discharge installations with two capacitors under nonzero initial conditions	39
---	----

High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering

Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage 44

Brzhezyskiy V.O., Vendychanskiy R.V., Trotsenko Ye.O., Haran Ya.O., Desyatov O.M., Khominich V.I. Characteristics of specialized single-phase high voltage doubler rectifier 54

Power Stations, Grids and Systems

Dehghani M., Montazeri Z., Ehsanifar A., Seifi A.R., Ebadi M.J., Grechko O.M. Planning of energy carriers based on final energy consumption using dynamic programming and particle swarm optimization 62

Electrical Safety

Glebov O.Yu., Koliushko D.G., Koliushko G.M., Eremeeva E.P. On the issue of design of grounding systems of 330(220) kV substations to ensure the electromagnetic compatibility of secondary circuits 72

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» – передплатне видання. Вартість передплати на 2019 рік – 644,94 грн., на два місяці – 107,49 грн., на чотири місяці – 214,98 грн., на шість місяців – 322,47 грн., на вісім місяців – 429,96 грн., на десять місяців – 537,45 грн. Передплатний індекс у каталозі ПАТ «УкрПошта»: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

Постановою президії ВАК України від 15 січня 2003 р. № 1-08/5 науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук та перереєстровано Наказом МОН України № 1328 від 21 грудня 2015 р. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.

Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу «Електротехніка і Електромеханіка» та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (ВИНИТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВИНИТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВИНИТИ.

Починаючи з №1 за 2006 р. згідно з Наказом МОН України №688 від 01.12.2005 р. журнал надсилається до УкрІНТЕЛ.

Електронна копія журналу «Електротехніка і Електромеханіка», зареєстрованому у Міжнародній системі реєстрації періодичних видань під стандартизованим кодом ISSN 2074-272X, надсилається до Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського і, починаючи з 2005 р., представлена на сайті бібліотеки (<http://nbuv.gov.ua/>) в розділі «Наукова періодика України», а також на офіційному сайті журналу (<http://eie.khpi.edu.ua/>).

Починаючи з №1 за 2016 р. усі статті на сайті доступні на двох мовах – обов'язково англійською, а також російською або українською. Також кожній статті в журналі присвоюється унікальний цифровий ідентифікатор DOI (Digital Object Identifier) від організації Crossref (<http://crossref.org/>).

Журнал «Електротехніка і Електромеханіка» включений у довідник періодичних видань Ulrich's Periodical Directory, представлений у загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка Наукова», реферативному журналі «Джерело», індексується у наукометричній базі даних Web of Science Core Collection: Emerging Sources Citation Index (ESCI), що рекомендована МОН України, а також у таких міжнародних базах даних: Index Copernicus (ICV2016:92.55), Російський Індекс Научного Цитування – РИНЦ (ELIBRARY), і входить до баз даних EBSCO, ProQuest, GALE, DOAJ тощо.



Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів статей відповідно до Вимог, які наведені на офіційному сайті журналу (<http://eie.khpi.edu.ua/>), розміщеному на платформі «Наукова періодика України» (<http://journals.urau.ua/>). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу.

М.І. Баранов, В.Ю. Розов, Є.І. Сокол

ДО 100-РІЧЧЯ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ – КОЛИСКИ ВІТЧИЗНЯНОЇ НАУКИ І ТЕХНІКИ

Зроблено короткий науково-історичний нарис про створення, розвиток і структуру Національної академії наук (НАН) України. Відзначена важлива роль НАН України в розвитку суспільства та міжнародній науково-технічній співпраці. Наведено основні наукові досягнення вчених НАНУ в різних областях науки, а також коротко викладено результати наукових досліджень, які досягнуті за останні кілька років Інститутом технічних проблем магнетизму НАН України та Інститутом іоносфери НАН і МОН України (м. Харків). Висвітлено співпрацю вчених-електротехніків НТУ «ХПІ» з науковими установами НАН України. Бібл. 28, рис. 10.

Ключові слова: Національна академія наук України, історія створення та розвитку.

Приведен краткий научно-исторический очерк о создании, развитии и структуре Национальной академии наук (НАН) Украины. Отмечена важная роль НАН Украины в развитии общества и международном научно-техническом сотрудничестве. Приведены основные научные достижения ученых НАНУ в различных областях науки, а также кратко изложены результаты научных исследований, достигнутые за последние несколько лет Институтом технических проблем магнетизма НАН Украины и Институтом ионосферы НАН и МОН Украины (г. Харьков). Освещено сотрудничество ученых-электротехников НТУ «ХПИ» с научными учреждениями НАН Украины. Библ. 28, рис.10.

Ключевые слова: Национальная академия наук Украины, история создания и развития.



«...Без наукових шкіл не буде науки.
Без науки не буде і техніки.»

(Із доповіді видатного
вченого сучасності,
президента НАН України
Б.Є. Патона, 2012 рік)

Вступ. Сучасні покоління людства незабаром стануть свідком унікального українського суспільно-наукового явища – наприкінці листопада 2018 р. своє 100-річчя відзначає Національна академія наук (НАН) України і її діючий президент, академік Б.Є. Патон. Ця подія символічна як по своїй формі, так і по своєму змісту. Починаючи не тільки з 1962 р., коли академік Патон Борис Євгенович очолив Академію наук УРСР (з 1994 р. НАН України), а впродовж всього свого життя цій видатній вченій сучасності йшов, як кажуть, «нога в ногу» з розвитком вітчизняної науки і техніки. Тому багаторічну науково-організаційну діяльність академіка Б.Є. Патона на посту президента НАН України слід розглядати як невід’ємну частину плідної роботи керівного штабу української науки і техніки. Без цієї важливої роботи було б неможливо скоординувати і направити в необхідному напрямку багатогранну діяльність численного науково-технічного співтовариства держави.

Людство на певному етапі свого тривалого розвитку об’єктивно прийшло до важливого висновку про те, що без нових науково-технічних ідей і технологій прогрес в суспільстві стає неможливим. Для отримання цих ідей і технологій в суспільстві треба активно проводити як фундаментальні, так і прикладні наукові дослідження. Для цих досліджень потрібні висококваліфіковані науково-технічні кадри різного профілю, за підготовку яких повинні відповідати спеціальні інституції суспільства. Нові технології можуть практично реалізовуватися в суспільстві тільки за допомогою нової техніки. Тому без нової техніки з більш високими технічними характеристиками забезпечити індустріальний прогрес суспільства принципово неможливо. В зв’язку з цим в передовому суспі-

лстві необхідний симбіоз науки і техніки. Для досягнення цього симбіозу стає необхідним відповідний координуючий орган. На нашу думку в Україні подібним керуючим органом стала Академія наук держави.

Метою статті є складання короткого науково-історичного нариса про створення і розвиток НАН України та досягнення її вчених, а також про плідну співпрацю НАН України і НТУ «ХПІ» МОН України.

1. Коротка історія створення НАН України. НАН України як Українська академія наук (УАН) була заснована 27 листопада 1918 р. урядом гетьмана П.П. Скоропадського [1], а видатний вітчизняний вчений-геохімік, академік В.І. Вернадський (рис. 1) був членом-засновником і першим президентом УАН [2].

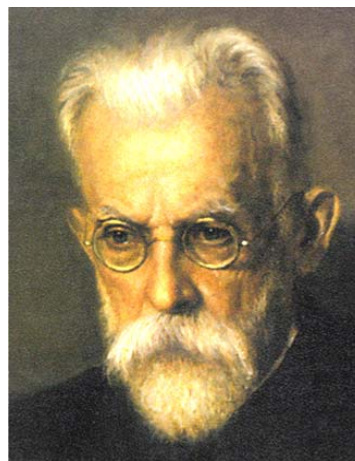


Рис. 1. Перший президент УАН, видатний вчений-геохімік, академік Вернадський В.І. (12.03.1863 р.-06.01.1945 р.)

Протягом багаторічної історії президентами Академії обиралися [2]: М.П. Василенко (1921-1922 рр.), О.І. Левицький (1922 р.), В.І. Липський (1922-1928 рр.), Д.К. Заболотний (1928-1929 рр.), О.О. Богомолець (1930-1946 рр.) та О.В. Палладін (1946-1962 рр.). З 1962 р. Академію очолює Б.Є. Патон (рис. 2).

Назва Академії зазнавала змін чотири рази [1]. У 1918-1921 рр. вона іменувалася як Українська

© М.І. Баранов, В.Ю. Розов, Є.І. Сокол



Рис. 2. Теперішній президент НАН України, видатний вчений в галузі електрозварювання матеріалів, академік НАН України Патон Б.С. (народився 27.11.1918 р.)

академія наук (УАН). З 1921 р. по 1936 р. – Всеукраїнська академія наук (ВУАН). У період 1936-1991 рр. – Академія наук Української РСР (АН УРСР). З 1991 р. по 1993 р. – Академія наук України (АН України), а з 1994 р. – Національна академія наук України (НАН України) [1]. УАН була найстарішою з республіканських академій за часів існування СРСР. У перший рік своєї діяльності (до 1920 р.) вона складалася всього з трьох наукових відділів: історико-філологічного, фізико-математичного і соціальних наук, які охоплювали 3 інститути, 15 комісій і національну бібліотеку [1]. Для порівняння відмітимо, що тепер у НАН України є 3 секції, 14 відділень, близько 170 інститутів та інших наукових установ, у яких працює біля 16 тисяч науковців [2].

В НАН України сформувався чимало наукових шкіл. Їх засновниками були [2]: видатні вчені-математики Д.О. Граве, М.М. Крилов, М.М. Боголюбов, Ю.О. Митропольський; механіки С.П. Тимошенко, О.М. Динник, М.О. Лаврентьев, Г.С. Писаренко; фізики К.Д. Синельников, А.К. Вальтер, Л.В. Шубников, В.С. Лашкар'єв, О.І. Ахієзер, О.С. Давидов, А.Ф. Прихотько, О.Я. Усиков; енергетики В.М. Хрушов, Г.Ф. Проскура; астрономи О.Я. Орлов, М.П. Барабашов, Є.П. Федоров, С.Я. Брауде; геолог П.А. Тутковський; матеріалознавці І.М. Францевич, В.І. Трефілов; хіміки Л.В. Писаржевський, О.І. Бродський, А.В. Думанський, В.І. Атрошенко; медики Д.К. Заболотний, О.О. Богомолец, В.П. Філатов, М.Г. Холодний, І.І. Шмальгаузен, М.М. Амосов. У всьому світі відомі українські школи електрозварювання Є.О. Патона, Б.С. Патона [3] і кібернетики В.М. Глушкова. Набули широкого визнання економічні й гуманітарні школи, які очолювали [2]: економісти М.В. Птуха і К.Г. Воблий; історики М.С. Грушевський і Д.І. Яворницький; правознавець В.М. Корецький; філософ В.І. Шинкарук; сходознавець А.Ю. Кримський; мовознавці Л.А. Булаховський, В.М. Русанівський; літературознавці С.О. Єфремов і О.І. Білецький.

Відзначимо, що академік Б.С. Патон – єдиний в світі глава державної Академії наук, який є її ровесником (день заснування Академії наук України і день його народження дивовижним чином збігаються – 27 листопада 1918 р.) [3]. Особисте спілкування з цією людиною-державником залишає на багато років незабутнє враження (рис. 3).



Рис. 3. Зустріч вчених НТУ «ХПІ» з президентом НАН України, академіком Б.С. Патонем після вручення Державних премій України в галузі науки і техніки за 2006 рік (м. Київ, Маріїнський палац, лютий 2007 р.)

2. Структура, органи управління і основні функції НАН України. НАН України згідно з чинним законодавством є вищою науковою установою України, що заснована на державній власності [4]. Самоврядність Академії полягає у самостійному визначенні тематики досліджень та форм їх організації й проведення, формуванні своєї структури, вирішенні науково-організаційних, господарських і кадрових питань, здійсненні міжнародних наукових зв'язків, виборності та колегіальності органів управління [4]. Академія об'єднує дійсних членів, членів-кореспондентів та іноземних членів, усіх науковців її установ. Вона організовує і здійснює фундаментальні та прикладні наукові дослідження з найважливіших проблем природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук [4]. Найвищим органом самоврядування НАН України є її Загальні збори, що складаються з дійсних членів (академіків) та членів-кореспондентів. У період між сесіями Загальних зборів керівництво роботою Академії здійснює Президія НАН України, яка обирається Загальними зборами строком на 5 років. До складу Президії НАН України на сьогодні входять 32 особи, в тому числі [4]: президент, п'ять віцепрезидентів, головний вчений секретар, 14 академіків-секретарів відділень та 11 інших членів. Станом на 01.01.2018 р. до складу НАНУ входять 177 дійсних членів (академіків), 352 члена-кореспондента та 98 іноземних членів, а загальна кількість працюючих в НАН України на цей час складала 29870 осіб, в тому числі 15529 наукових працівників. Серед них 2362 докторів наук та 6807 кандидатів наук [4].

В НАН України функціонують 3 секції (фізико-технічних і математичних наук; хімічних і біологічних наук; суспільних і гуманітарних наук), що об'єднують 14 відділень наук [4]: математики; інформатики; механіки; фізики та астрономії; наук про Землю; фізико-технічних проблем матеріалознавства; фізико-технічних проблем енергетики; ядерної фізики та енергетики; хімії; біохімії, фізіології і молекулярної біології; загальної біології; економіки; історії, філософії та права; літератури, мови та мистецтвознавства. В Академії діють 5 регіональних наукових центрів подвійного з Міністерством освіти і науки (МОН) України підпорядкування [4]: Донецький (м. Покровськ), Західний (м. Львів), Південний (м. Одеса), Північно-східний (м. Харків), Придніпровський (м. Дніпро),

а також Центр оцінювання наукових установ та розвитку регіонів (м. Київ). До відділень НАН України входять відповідні науково-дослідні інститути та інші наукові установи (обсерваторії, ботанічні сади, дендропарки, заповідники, бібліотеки, музеї тощо), які є основною ланкою структури академії.

Вчені НАН України є активними учасниками міжнародних програм, що здійснюються за підтримки таких іноземних та міжнародних фондів та організацій, як [4]: Європейська комісія, УНТЦ, NATO, UNESCO, DFG, CRDF тощо. За грантами цих організацій, здобутих на конкурсній основі, реалізуються щорічно близько 300 дослідницьких, координаційних та підтримуючих науковий обмін науково-технічних проектів. Зазначимо, що відповідно до Угоди про асоціацію з ЄС розширюються зв'язки з науковими центрами країн ЄС та організаціями Європейської комісії, зокрема щодо участі в програмах ЄС з досліджень та інновацій «Горизонт 2020», ЄВРАТОМ, а також плідної взаємодії на постійній основі з Об'єднаним дослідницьким центром Єврокомісії (JRC) [4, 5]. НАН України здійснює незалежну наукову оцінку проектів стратегічних, прогнозних та програмних документів (доктрин, концепцій, стратегій тощо), а також матеріалів державного рівня за дорученням Президента України, Верховної Ради України, Кабінету Міністрів України та/або з власної ініціативи розробляє пропозиції щодо засад державної наукової і науково-технічної політики, прогнози, інформаційно-аналітичні матеріали, пропозиції, рекомендації щодо суспільно-політичного, соціально-економічного, науково-технічного, інноваційного та гуманітарного розвитку держави, здійснює науково-технічну експертизу чисельних проектів законів,

3. Основні наукові досягнення НАН України.

18 травня 2017 р. Президент України підписав Указ №136/2017 про відзначення 100-річного ювілею НАН України, яке заплановане на листопад 2018 р. З якими результатами зустрічає академія свій ювілей?

НАН України є одним із визначних наукових центрів світу, який збагатив вітчизняну і світову науку цінними відкриттями й винаходами. Так, вчені фізики академії в ХХ сторіччі здійснили ряд важливих наукових досліджень в галузі теоретичної та експериментальної фізики, а також у сфері вивчення фізичних властивостей напівпровідників (наприклад, германієвих діодів і тріодів) [1, 4]. Широко відомі з того періоду фундаментальні наукові праці фізиків Українського фізико-технічного інституту (УФТІ, м. Харків, нині НТЦ «ХФТІ»): академіків О.І. Лейпунського і А.К. Вальтера в галузі фізики атомного ядра і потужних прискорювачів заряджених частинок, а також академіка К.Д. Синельникова в сфері фізики вакууму, вакуумної металургії і високотемпературної плазми [6]. У цьому інституті в 1965 р. було споруджено найбільший в Європі лінійний прискорювач електронів на енергію до 2000 МеВ [6]. Крім того, харківськими вченими у цей період був споруджений найбільший в світі радіотелескоп типу УТР-2 (рис. 4), який розташований поблизу селища Граково (Харківська обл.) [7]. Радіотелескоп типу УТР-2 має Т-образну форму розташування антен із загальною площею в 150 тис. м². Він і на сьогодні є одним з найпотужніших в світі

науково-технічних інструментів дослідження Всесвіту. Відзначимо, що за допомогою радіотелескопа типу УТР-2, який зараз належить РІАН НАН України, був створений атлас зворотного боку Місяця. Ця заслуга належить уродженцеві Харківської обл., відомому радянському вченому-астроному, академіку АН УРСР, професору Харківського державного університету М.П. Барабашову [7].



Рис. 4. Загальний вигляд об'єкту національного надбання України «Радіотелескоп УТР-2 із системою інтерферометрів УРАН» Радіоастрономічного інституту НАН України (с. Граково, Харківська обл.)

Праці академіків М.М. Крилова і М.М. Боголюбова та їхніх учнів є видатним внеском у галузі дослідження наближених методів математичного аналізу і теорії динамічних систем. Ці відомі в світі українські математики створили по-суті новий розділ в галузі математичної фізики – нелінійну механіку. Значним внеском у вітчизняну і світову науку є наукові праці академіка Г.Ф. Проскури з аерогідродинаміки та дослідження академіка М.О. Лаврентьєва з геометричної теорії функцій комплексної змінної та її практичного застосування для вирішення актуальних сучасних технічних проблем гідродинаміки й аеродинаміки.

В Інституті електротехніки АН УРСР (зараз Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ) вперше в СРСР була створена мала електронна обчислювальна машина. У багатьох технічних галузях АН УРСР вийшла на перше місце в СРСР (наприклад, в порошкової металургії та електрозварюванні). Вчені-хіміки АН УРСР першими в СРСР одержали «важку воду» для потреб ядерної фізики і енергетики, а також відповідні ізотопи водню і кисню для проведення комплексу перспективних експериментальних ядерно-фізичних досліджень [1, 4, 8]. У матеріалознавчих інститутах академії успішно розроблялися технологічні процеси, які давали можливість по-новому спрямувати розвиток цілих галузей економіки. Вагомі наукові результати були отримані в інститутах хімічної технології, біохімії, фізіології і теоретичної медицини, загальної біології.

Багатогранний та потужний внесок в розвиток світової науки та нашої держави НАН України робить і сьогодні. Сучасні досягнення вчених академії за 2017 р., які вказані в підсумковому щорічному звіті президента НАН України, академіка Б.Є. Патона [9], підтверджують, що НАН України продовжує гідно виконувати свої статутні обов'язки. Так, в складних умовах праці 2017 року, при значному недофінансуванні Академії, науковцями НАН України були отри-

мані наступні вагомі фундаментальні та прикладні результати в різних галузях науки [9], в тому числі:

- отримані нові розв'язки рівнянь Магісона-Папапетру, які виявили досі не відомі особливості руху швидких частинок із власним обертовим моментом довкола чорної діри Шварцшильда в космічній моделі Сіттера;

- розроблені нові високоефективні об'єднання кібернетичних алгоритмів, що дають змогу фахівцям розпаралелювати процес розв'язання складних дискретних оптимізаційних задач великої розмірності;

- розроблено принципово новий спосіб транспортування лікарських препаратів у крові людини, суть якого полягає у зв'язуванні спеціально модифікованих молекул лікарських препаратів із ліпопротеїновими частинками плазми людської крові;

- зроблені два надзвичайно вагомі проривні відкриття в галузі позагалактичної астрономії та космології (мова йдеться про відкриття двох галактик, одна з яких – галактика з найменшим змістом хімічних елементів, важчих за гелій, а друга – галактика, випромінювання якої є настільки потужним, що здатне іонізувати нейтральне міжгалактичне середовище в епоху реіонізації Всесвіту);

- створені нові функціональні наноматеріали на основі інтеграції важливих функціональних характеристик графену, оксидів графену, неорганічних напівпровідників із властивостями спряжених електропровідних полімерів;

- отримані нові невідомі раніше конденсовані похідні піримідину, що ефективно пригнічують шкідливий вірус папіломи людини;

- виявлена та вивчена біохіміками низка сполук, ефективних проти збудників мультирезистентного туберкульозу;

- доведено, що ацетилхолінові рецептори відіграють важливу роль в активації регуляторних β -лімфоцитів, пригнічуючи синтез антитіл й активуючи процеси регенерації печінки;

- вчені-біологи вивчали молекулярно-генетичні властивості п'яти вірусів ентеробактерій, що розглядаються як перспективні агенти фаготерапії опіків плодкових рослин;

- обґрунтована нова концепція організації природоохоронних територій поліфункціонального типу з різними гнучкими режимами охорони, яка передбачає запровадження екосистемного принципу замість територіального;

- побудована на потужних суперкомп'ютерах СКІТ тривимірна комп'ютерна модель поверхні Мохо (або ж Мохоровичича), яка призначена для точного пошуку й оцінювання запасів надглибоких нафтогазових родовищ, розвідка яких шляхом традиційного буріння коштує дуже дорого;

- за цільовою програмою наукових досліджень НАН України «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» розроблено ефективну інформаційну технологію класифікації земного покриву, що дає змогу отримувати оцінки площ у масштабі всієї країни та є ключовою складовою комплексної оцінки розвитку «розумного міста» у контексті комфорту й безпеки проживання в ньому;

- вчені-механіки спільно з фахівцями ДП «КБ «Південне» імені М.К. Янгеля» розробили спеціальний модуль відведення третього ступеня ракети-носія, який, серед іншого, пропонується використовувати для відведення з орбіти третього ступеня ракети-носія «Циклон-4М» і космічних апаратів, що відпрацювали термін свого активного існування;

- вчені-матеріалознавці створили автоматизований широкографічний комплекс, який дає змогу фахівцям дистанційно контролювати якість конструкцій із металевих і композиційних матеріалів у режимі реального часу;

- вчені-теплофізики розробили багатостадійну технологію й установку з виробництва теплоізоляційного надтонкого базальтового волокна, що важливо для подальшого створення нової екологічно безпечної, довговічної та пожежостійкої теплової ізоляції для цивільного будівництва;

- вчені-хіміки запропонували високоефективні способи переробки рослинних відходів та осадів Бортицької станції аерації;

- вчені-біохіміки країни апробували новий гемостатичний засіб, призначений для застосування пацієнтами з вродженими патологіями системи гемостазу, зокрема гемофілією;

- розроблено технологію отримання рекомбінатної креатиніндамінази – чутливого елемента сенсора на креатинін, що слугує біомаркером ниркової недостатності й показником ефективності процесу гемодіалізу;

- розроблена високоефективна інноваційна технологія відновлення мовлення постінсультних пацієнтів, особливістю якої є персоналізована активація резервів організму хворого;

- розроблено першу в нашій країні Національну мережу інформації з біорізноманіття (UkrBIN);

- вчені-економісти створили інформаційно-аналітичну систему для прогнозування розвитку вітчизняної енергетики;

- вчені-ядерники, енергетики та фахівці з ядерної безпеки обґрунтували термін і показали можливість подовження безпечної експлуатації ядерного реактору енергоблоку №2 Південноукраїнської АЕС щонайменше на 20 років у понадпроектний період, тобто до 2048 р., а ядерного реактору енергоблоку №4 Рівненської АЕС – щонайменше до 2026 р.;

- свою ефективність довела розроблена вітчизняними ученими система РОДОС, яка призначена для прогнозування і підтримки ухвалення рішень із реагування на радіаційні аварії на українських АЕС;

- завершено процес впровадження у промислове виробництво препарату «Метовітан», який виконує енергостимулювальну, кардіопротекторну та гепатопротекторну функції і запобігає старінню організму;

- за участю вчених-кібернетиків розроблені мережі для групової роботи вітчизняних роботизованих наземних і повітряних бойових систем;

- вченими виконано великий комплекс робіт зі створення: імпортозаміщувальних елементів, у тому числі напівпровідникової елементної бази для обслуговування високоточного озброєння; технології з продовження ресурсу авіаційної і бронетанкової техніки; матеріалів з жароміцних і жаростійких композитів для

камер згорання газотурбінних двигунів; компонентів твердого ракетного палива; технології лазерного та дугового зварювання тонкостінних елементів керма й сопла керованих ракет і для підводного зварювання корпусів військових кораблів в екстремальних умовах; технології зміцнення й обробки гладкоствольних та нарізних каналів стволів різного калібру; технології створення композитних прозорих і шаруватих структур із кераміки та сплавів легких металів для захисту легкоброньованої техніки; технології створення покриттів, що мінімізують помітність техніки в НВЧ, ВЧ і ІЧ діапазонах електромагнітних хвиль.

4. Харківська академічна наука. Харків'яни пишуться тим, що їх місто і зараз – друге в країні після м. Києва за потужністю академічної науки. Так, в м. Харкові розташовано 13 наукових інститутів НАН України, які представляють 3 Секції та 6 Відділень НАН України. Це Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна (ФТІНТ), Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усікова (ІРЕ), Радіоастрономічний інститут (РААН), Інститут іоносфери НАН і МОН України (ІОН), які входять у Відділення фізики і астрономії. У Відділення ядерної фізики та енергетики входять Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ «ХФТ»), бувший УФТІ) і Інститут електрофізики та радіаційних технологій (ІЕРТ). У Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства входять Науково-технологічний комплекс «Інститут монокристалів» (НТК «ІМК»), Інститут монокристалів (ІМК), Інститут сцинтиляційних матеріалів (ІСМА). Відділення біології, фізіології та молекулярної біології представлено Інститутом проблем кріобіології і кріомедицини (ІПКК), а відділення економіки – Науково-дослідним центром індустріальних проблем розвитку (НДЦ «ІПР»).

Близькі читачам журналу «Електротехніка і електромеханіка» технічні науки в м. Харкові представляють Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного (ІПМаш) та Інститут технічних проблем магнетизму (ІТПМ), які входять у широко відоме політехнікам відділення фізико-технічних проблем енергетики (ВФТПЕ) НАН України.

Академічні Інститути мають потужну та унікальну науково-експериментальну базу. Так, у м. Харкові розташовано 6 наукових об'єктів, які становлять Національне надбання України [10]. Це такі об'єкти, як «Ядерно-фізичні установки» ННЦ «ХФТ»; «Комплекс для фізичних досліджень при наднизьких температурах» ФТІНТ; «Кріомагнітний радіоспектроскопічний комплекс міліметрового діапазону довжин хвиль» ІРЕ; «Радіотелескоп УТР-2 із системою інтерферометрів УРАН» РААН (рис. 4), «Іоносферний зонд» ІОН (рис. 5); «Гідродинамічні стенти» ІПМаш і «Магнітодинамічний комплекс» ІТПМ.

Інститут іоносфери НАН і МОН України. Він є близьким до НТУ «ХП» за історією та територіальним розташуванням. Він створений в 1991 році на базі кафедри радіоелектроніки НТУ «ХП». Цей інститут має у своєму складі унікальну іоносферну обсерваторію, іоносферний зонд якої є об'єктом національного надбання України [11]. Загальний вигляд цього унікального об'єкта – радара некогерентного розсіяння (НР) із zenітною параболічною антеною типу НДА-100, діаметр якої дорівнює 100 м, представлений на рис. 5 [12].



Рис. 5. Об'єкт національного надбання України «Іоносферний зонд» Інституту іоносфери НАН і МОН України (м. Зміїв, Харківська обл.)

Починаючи з 1996 р. у даній обсерваторії Інституту іоносфери спільно із обсерваторією Хейстек Масачусетського технологічного інституту і обсерваторією Аресибо Корнелльського університету (США) проводилися регулярні дослідження завишки-часової залежності відносної концентрації легких іонів методом некогерентного розсіяння згідно Міжнародному геофізичному календарю, що дозволило виявити у іоносфері Землі довготні і широтні варіації концентрації іонів водню [12]. Ці дослідження мають важливе практичне значення для забезпечення безпеки польотів на навколоремних орбітах супутників різного призначення та інших космічних апаратів, прогнозування стану радіозв'язку і погоди [11, 12].

Інститут технічних проблем магнетизму НАН України. ІТПМ є єдиною в м. Харкові академічною науковою установою, що працює в галузі електротехніки. Установа була заснована у 1970 р. [13] і функціонувала до 1991 р. як Харківське відділення Всесоюзного науково-дослідного інституту електромеханіки – головна організація в СРСР з розробки «маломагнітного» корабельного електрообладнання. У 1992 році ця установа як юридична особа в статусі відокремленого Відділення магнетизму Інституту електродинаміки увійшла до складу НАН України, яке у 2005 році було перетворено на Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів (НТЦ МТО НАН України) з правами науково-дослідного інституту. У 2010 році установа відзначила свій 40-річний ювілей (рис. 6).



Рис. 6. Наукова доповідь чл.-кор. НАНУ Розова В.Ю., що присвячена 40-річчю заснування НТЦ МТО НАН України (м. Харків, 2010 р.)

У 2013 р. цю Установу було перейменовано на Інститут технічних проблем магнетизму (ІТПМ) НАН України. ІТПМ НАН України є єдиною в Україні та світі науковою установою, що комплексно проводить теоретичні та експериментальні наукові дослідження статичного та низькочастотного (з частотою 0÷5000 Гц) магнітного поля, яке створюється різноманітними технічними об'єктами (кораблями, транспортними засобами, орбітальними космічними апаратами, магістральними трубопроводами, електротехнічним обладнанням, будівельними конструкціями, тощо). Дослідження проводяться за наступними затвердженими науковими напрямками: теорія магнетизму технічних об'єктів; визначення магнітних характеристик технічних об'єктів; управління магнітним полем технічних об'єктів; зменшення електромагнітного впливу об'єктів електроенергетики на людину та навколишнє середовище. Результати досліджень ІТПМ за цими напрямками відповідають міжнародним стандартам високого рівня завдяки унікальному науковому колективу інституту, комплексному підходу до вирішення наукових проблем магнетизму різних технічних об'єктів, а також широкому використанню потужної і унікальної експериментальної бази інституту – його «Магнітодинамічного комплексу» при проведенні як фундаментальних, так і прикладних досліджень (рис. 7). За період роботи у складі НАН України фахівцями ІТПМ на основі узагальнення особливостей різних класів технічних об'єктів (кораблів, бронетехніки, трубопроводів, космічних апаратів та електроенергетичного обладнання) як джерел магнітного поля, сформовано новий науковий напрям – «магнетизм технічних об'єктів», що спрямований на вивчення сукупності магнітних властивостей технічних об'єктів та явищ, пов'язаних із взаємодією технічних об'єктів і навколишнього середовища через магнітне поле. В рамках цього напрямку отримано принципово нові наукові результати світового рівня, які впроваджено в оборонну і космічну вітчизняні галузі, паливно-енергетичний комплекс та медичну екологію.



Рис. 7. Унікальний магнітовимірвальний стенд об'єкту національного надбання України «Магнітодинамічний комплекс» Інституту технічних проблем магнетизму НАН України (м. Харків.)

Серед найбільш важливих прикладних результатів ІТПМ можна відзначити створення та впровадження промислової технології високоточного вимірювання магнітних характеристик космічних апаратів розробки ДП «КБ «Південне» на Магнітодинамічному комплексі інституту [14]. Розроблена технологія стала складовою частиною технології створення вітчизняних космічних апаратів і дозволила забезпечити якіс-

не магнітне управління космічними апаратами (КА) типів «Мікросупутник», «EgiptSat-1», «Січ-2» (рис. 8), «Мікросат», «Січ-2-1» та розробку ряду перспективних КА в частині їх магнітних характеристик.

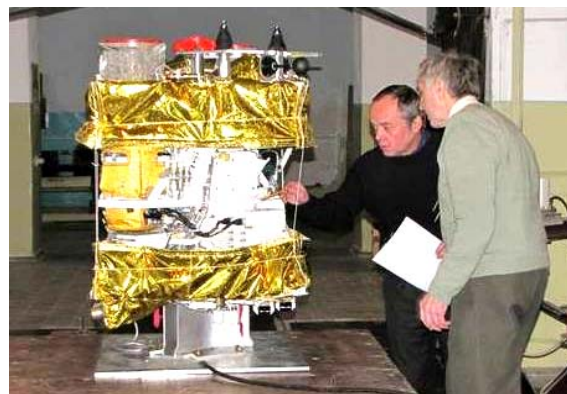


Рис. 8. Визначення магнітних характеристик льотного зразка космічного апарату «Січ-2» на магнітовимірвальному стенді Інституту технічних проблем магнетизму НАН України (м. Харків, 2010 р.)

Важливим практичним результатом наукової діяльності ІТПМ НАНУ стала також розроблена і впроваджена на магістральних трубопроводах України та інших країн (рис. 9) промислова технологія розмагнічування зварювальних стиків труб великого діаметру, що дає змогу істотно підвищити якість електрозварювання при ремонтних роботах за рахунок виключення явища «магнітного дугтя» дуги [15]. Зараз впроваджено близько 80 розмагнічувальних пристроїв. Важливе соціальне значення мають розроблені за останні п'ять років в ІТПМ методи та засоби визначення і нормалізації магнітного поля промислової частоти у житлових приміщеннях і на робочих місцях об'єктів електроенергетики, а також техногенного гіпгеомагнітного поля. За цим напрямком виконано ряд важливих і актуальних розробок, серед яких можна відзначити наступні:



Рис. 9. Ремонтні роботи на магістральному газопроводі ДУ 1200×12 мм «Уренгой-Помари-Ужгород» з використанням розробленої в ІТПМ НАН України технології розмагнічування зварювальних стиків (м. Тернопіль, 2017 р.)

1. Розроблено новий метод моделювання та розрахунку магнітного поля трифазних ЛЕП, який, на відміну від відомих, дозволяє використовувати в якості розрахункових величин виключно діючі значення магнітної індукції, що підлягають як нормуванню, так і вимірюванню стандартними приладами [16, 17]. Такий підхід істотно спрощує як експериментальну перевірку

(верифікацію) розрахунку рівня магнітного поля, так і його санітарно-гігієнічну оцінку. Результати роботи, склали наукову основу нового нормативного документу Міненерговугілля СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика» (зі змінами), що введений в дію наказом Міненерговугілля від 01.07.2016 р. № 423.

2. Запропоновано новий метод зменшення магнітного поля високовольтних ЛЕП – метод векторної компенсації магнітного поля, що не потребує додаткового відчуження земельних ділянок і дозволяє за рахунок оптимального просторового розподілу розщеплених фазних проводів ЛЕП на порядок зменшувати рівень їх магнітного поля [18]. Рекомендації з реалізації цього методу передані до впровадження в енергетичну галузь України (ДП «НЕК Укренерго»).

3. Розроблено та експериментально обґрунтовано новий метод синтезу систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти, яке створюється високовольтними повітряними ЛЕП в розташованих поблизу житлових будинках [19, 20]. Реалізація запропонованого методу, що виконується у замкненій структурі, складає наукову основу новітньої вітчизняної технології зменшення до безпечного рівня магнітного поля промислової частоти в житлових приміщеннях. Ця технологія має істотні економічні переваги перед відомими закордонними технологіями активного екранування магнітного поля повітряних ЛЕП, що широко застосовуються в світі.

4. Розроблено теоретичні основи побудови нових систем контурного екранування магнітного поля високовольтних кабельних ЛЕП, що в порівнянні з кращими світовими зразками мають на 30 % меншу кількість елементів при високій ефективності екранування (до 10 одиниць) [21-23]. Результати досліджень склали наукову основу першої вітчизняної технології проектування екологічно чистих кабельних ЛЕП напругою до 330 кВ, що розроблена на замовлення ДП «НЕК Укренерго» і впроваджена в нормативному документі Міненерговугілля СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 «Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настапова» (нова редакція), що введена в дію у 2017 році наказом Міненерговугілля від 26.01.2017 р. №82.

5. Вперше досліджено механізм біотропного ослаблення природного статичного геомагнітного поля в приміщеннях сучасних житлових будинків, що спричинене намагніченістю їх сталевих конструктивних елементів. Розроблені рекомендації з проектування «магніто-чистих» житлових і громадських будівель, що не чинять негативного магнітного впливу на населення, в тому числі шляхом використання при будівництві житлових будинків спеціальної слабомагнітної сталі з відносною магнітною проникністю не більше 70 одиниць замість стандартного будівельного металопрокату з магнітною проникністю біля 300 одиниць [24-26].

В останні роки нарощується співпраця ІТПМ з НТУ «ХП». Так, у 2014 р. спільно створено та забезпечено функціонування третьої в Україні докторської спеціалізованої вчені ради Д 64.050.17 із захисту дисертацій за спеціальністю 05.09.05 «Теоретична електротехніка». З 2014 р. розпочато спільний випуск науково-практичного журналу «Електротехніка і елект-

ромеханіка» (свідоцтво КВ №21021-10821ПР від 07.10.2014 р.), який у 2017 році завдяки росту його наукового рівня включений до провідної світової наукометричної бази Web of Science, і поки-що є єдиним в НТУ «ХП» науковим журналом найвищого рівня. У 2017 році розпочата спільна підготовка в аспірантурі НТУ «ХП» фахівців третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», яке здійснюється під спільним науковим керівництвом учених НТУ «ХП» та ІТПМ НАНУ. Вже більш 10 років спільно з НТУ «ХП» проводиться щорічний міжнародний симпозиум «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки (SIEMA)». Розширюється традиційна співпраця ІТПМ НАНУ та НТУ «ХП» за договорами про науково-технічне співробітництво. Проводяться спільні дослідження з кафедрами інженерної електрофізики, автоматизованих електромеханічних систем, електричних апаратів, теоретичних основ електротехніки НТУ «ХП», стажування викладачів, читання лекцій студентам та їх виробнича переддипломна практика.

5. Співпраця НТУ «ХП» з Інститутом електродинаміки НАНУ. Виходячи з професійних інтересів основних читачів журналу «Електротехніка і електромеханіка» – фахівців в галузі електротехніки, найбільшій близькими ним є інститути відділення фізико-технічних проблем енергетики НАНУ електротехнічного профілю, в тому числі Інститут електродинаміки НАН України (м. Київ). З ІЕД НАНУ політехніків в першу чергу пов'язує спільне проведення міжнародної Науково-технічної конференції «Силова електроніка і енергоефективність» (СЕЕ), яку починаючи з 1993 р. і по цей час спільно з ІЕД проводить кафедра промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХП». За цей час завдяки масштабності, високому науковому та організаційному рівню конференції СЕЕ вона стала потужним каталізатором науково-технічних сил НТУ «ХП» та ІЕД із вирішення проблем енергозбереження шляхом використання засобів силової та інформаційної електроніки, справжньою «кузницею» спільної підготовки кадрів вищої кваліфікації [27, 28]. Керують роботою конференції від ІЕД академіки НАН України Б.С. Стогній, А.К. Шидловський, О.В. Кириленко та від НТУ «ХП» член-кореспондент НАН України Є.І. Сокол (рис. 10).



Рис. 10. Учасники конференції СЕЕ'2010 – професор Б.В. Клепиков, академік О.В. Кириленко, академік Б.С. Стогній, чл.-кор. Є.І. Сокол (м. Алушта, 2010 р.)

Успішна співпраця таких наукових установ НАН України електротехнічного профілю як Інститут

електродинаміки та Інститут технічних проблем магнетизму з НТУ «ХПІ» підтверджує перспективність більш глибокої інтеграції в нашої державі вузівської та академічної науки.

Висновки. Свій 100-річний ювілей Національна Академія наук України відзначає новими визначними науковими досягненнями, які підтверджують, що без науки в сучасному суспільстві немислимий технічний прогрес. Для того, щоб Україна в майбутньому стала однією з високотехнологічних держав світу, в ній одним з пріоритетних напрямів розвитку на державному рівні повинна стати вітчизняна наука і в першу чергу, технічна. Рівень її державної фінансової підтримки повинен відповідати прийнятним в передових країнах світу показникам – не менше 1,7 % від ВВП.

Спільний науковий потенціал НАН України і університетської науки ще дозволяє підняти технологічний рівень нашої країни до світового. Однак, для практичної реалізації цієї високої по своїй меті науково-технологічної задачі державного значення, необхідна консолідація суспільства, непохитна воля керівництва країни в її досягненні. Дуже сподіваємося на те, що в наступне 100-річчя Національна академія наук України увійде, відчуваючи необхідну підтримку держави.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Національна_академія_наук_України.
2. <http://www.nas.gov.ua/UA/About/Pages/history.aspx>.
3. https://ru.wikipedia.org/wiki/Патон_Борис_Евгеньевич.
4. <http://www.nas.gov.ua/UA/About/Pages/default.aspx>.
5. <http://files.nas.gov.ua/text/infNASU/nasudovidnyk2016.pdf>.
6. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 3-х томах. Том 3. – Х.: ФЛП Панов А.Н., 2016. – 415 с.
7. <https://all-ukraine.com.ua/ru/object.html?id=2864>.
8. Національна академія наук України: статистичний і наукометричний аналіз ефективності наукового потенціалу / Б.А. Маліцький, О.О. Грачев, О.Н. Кубальський, В.А. Корнілов, В.П. Рибачук, В.І. Хоревін, Н.Г. Віденіна, Л.Р. Головащенко, Л.П. Овчарова; гол. ред. акад. НАН України В.Л. Богданов. ДУ «Інститут дослідж. наук.-техн. потенціалу та історії науки ім. Г.М. Доброва». – К.: Фенікс, 2016. – 228 с.
9. <http://files.nas.gov.ua/text/report/2017ua.pdf>.
10. <http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/NationalProperty/Pages/default.aspx>.
11. https://ru.wikipedia.org/wiki/Інститут_іоносфери_НАН_і_МОН_України.
12. https://ua.igotoworld.com/ru/poi_object/66097_institute-of-ionosphere.htm.
13. Розов В.Ю. К 40-летию Научно-технического центра магнетизма технических объектов НАН Украины. История, достижения, перспективы // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №3. – С. 74-80.
14. Розов В.Ю., Гетьман А.В., Петров С.В., Ерисов А.В. Меланченко А.Г., Хорошилов В.С., Шмидт И.Р. Магнетизм космических аппаратов // *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – Ч.2. – 2010. – С. 144-147.
15. Волохов С.А., Добродеєв П.Н., Мамин Г.И. Комплексная демагнетизация труб при электродуговой сварке // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – №5. – С. 19-24.
16. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.Н. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – №1. – С. 3-9.
17. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи. // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – №5. – С. 11-13.
18. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю., Пелевин

Д.Е. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – №2. – С. 3-9.

19. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Кобылянский Б.Б. Синтез систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи на основе многокритериальной оптимизации // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – №6. – С. 26-30.
20. Розов В.Ю., Пелевин Д.Е., Гринченко В.С., Чунихин К.В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – №3. – С. 6-8.
21. Розов В.Ю., Квицинский А.А., Добродеєв П.Н., Гринченко В.С., Ерисов А.В., Ткаченко А.О. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №4. – С. 56-61.
22. Розов В.Ю., Добродеєв П.Н., Квицинский А.А. Двухконтурное пассивное экранирование магнитного поля высоковольтных кабельных линий в зонах соединительных муфт // *Технічна електродинаміка*. – 2017. – №1. – С. 23-28.
23. Розов В.Ю., Ерисов А.В., Ткаченко А.О., Гринченко В.С. Аналитический расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей // *Технічна електродинаміка*. – 2017. – №2. – С. 13-18.
24. Розов В.Ю., Завальный А.В., Золотов С.М., Грецких С.В. Методы нормализации статического геомагнитного поля в жилых домах // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №2. – С. 35-40.
25. Розов В.Ю., Левина С.В. Моделирование статического геомагнитного поля внутри помещений современных жилых домов // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – №4. – С. 8-10.
26. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Левина С.В. Исследование явления ослабления статического геомагнитного поля стальной колонной // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – №1. – С. 12-19.
27. Сокол Е.И., Кипенский А.В., Кривошеев С.Ю. Учебно-методическая работа и научно-исследовательская деятельность кафедры промышленной и биомедицинской электроники национального технического университета «ХПИ» (к 55-летию со дня основания) // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2018. – №26(1302). – т.1. – С. 3-12.
28. Кафедра промышленной и биомедицинской электроники НТУ «ХПИ». История. Достижения. Перспективы / ред. кол.: В.Т. Долбня, Е.И. Сокол, С.Ю. Кривошеев и др. – Х.: Золотые страницы, 2013. – 224 с.

REFERENCES

1. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/National_Academy_of_Sciences_of_Ukraine (accessed 12 June 2017).
2. Available at: <http://www.nas.gov.ua/EN/About/Pages/history.aspx> (accessed 08 September 2017).
3. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Borys_Paton (accessed 22 April 2018).
4. Available at: <http://www.nas.gov.ua/EN/About/Pages/default.aspx> (accessed 02 May 2018).
5. Available at: <http://files.nas.gov.ua/text/infNASU/nasudovidnyk2016.pdf> (accessed 26 October 2017).
6. Baranov M.I. *Antologija vydajushhishja dostizhenij v nauke i tehnikе: Monografija v 3-h tomah. Tom 3* [An anthology of the distinguished achievements in science and technique: Monograph in 3 volumes. Volume 3]. Kharkiv, PhPB Panov A.N. Publ., 2016. 415 p. (Rus).
7. Available at: <https://all-ukraine.com.ua/ru/object.html?id=2864> (accessed 13 July 2017). (Rus).
8. Malicjkyj B.A., Ghrachev O.O., Kubaljskyj O.N., Kornilov V.A., Rybachuk V.P., Khorjevyn V.I., Videnina N.G., Gholovashchenko L.R., Ovcharova L.P. *Nacionaljna akademija nauk Ukra-*

jiny: statystychnyj i naukometrychnyj analiz efektyvnosti naukovogo potencijalu [National academy of sciences of Ukraine: statistical and scientific-metrical analysis of efficiency of scientific potential]. Kyiv, Phoenix Publ., 2016. 228 p. (Ukr).

9. Available at: <http://files.nas.gov.ua/text/report/2017ua.pdf> (accessed 13 April 2018). (Ukr).

10. Available at: <http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/NationalProperty/Pages/default.aspx>. (Ukr).

11. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Институт_ионосферы_НАН_и_МОУ_Украины (accessed 28 February 2018). (Rus).

12. Available at: https://ua.igotoworld.com/ru/poi_object/66097_institute-of-ionosphere.htm (accessed 15 June 2017). (Rus).

13. Rozov V.Yu. To the 40th anniversary of the Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects of the NAS of Ukraine. *Technical electrodynamics*, 2010, no.3, pp. 74-80. (Rus).

14. Rozov V.Yu., Getman A.V., Petrov S.V., Erisov A.V., Melanchenko A.H., Horoshilov V.S, Shmidt I.R. Magnetism of spacecraft. *Technical electrodynamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2010, chapter 2, pp. 144-147. (Rus).

15. Volokhov S.A., Dobrodeiev P.N., Mamin G.I. Integrated demagnetization of pipes at arc welding. *Technical electrodynamics*, 2012, no.4, pp. 19-24. (Rus).

16. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Yakovenko V.N. The research of magnetic field of high-voltage ac transmissions lines. *Technical Electrodynamics*, 2012, no.1, pp. 3-9. (Rus).

17. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Piliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. *Technical electrodynamics*, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).

18. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Pyligina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Technical electrodynamics*, 2013, no.2, pp. 3-9. (Rus).

19. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B. Synthesis of an active shielding system of the magnetic field of power lines based on multiobjective optimization. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.6, pp. 26-30. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.05.

20. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chunikhin K.V. Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines. *Technical electrodynamics*, 2016, no.3, pp. 6-8. (Rus). doi: 10.15407/techned2016.03.006.

21. Rozov V.Yu., Kvytsynskiy A.A., Dobrodeiev P.N, Grinchenko V.S., Erisov A.V., Tkachenko A.O. Study of the magnetic field of three phase lines of single core power cables with two-end bonding of their shields. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 4, pp. 56-61 (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.11.

22. Rozov V.Yu., Dobrodeiev P.N., A.A. Kvytsynskiy A.A. Double-circuit passive shielding of the magnetic field of high-voltage cable lines in junction zones. *Technical electrodynamics*, 2017, no.1, pp. 23-28. (Rus). doi: 10.15407/techned2017.01.023.

23. Rozov V.Yu., Tkachenko O.O., Yerisov A.V., Grinchenko V.S. Analytical calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields. *Technical electrodynamics*, 2017, no.2, pp. 13-18. (Rus). doi: 10.15407/techned2017.02.013.

24. Rozov V.Yu., Zavalnyi A.V., Zolotov S.M., Gretsikh S.V. The normalization methods of the static geomagnetic field inside houses. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no.2, pp. 35-40 (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.2.07.

25. Rozov V.Yu., Levina S.V. Modeling of the static geomagnetic field indoor dwelling houses. *Technical electrodynamics*, 2014, no.4, pp. 8-10. (Rus).

26. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Levina S.V. The study of the effect of weakening of static geomagnetic field by steel columns. *Technical electrodynamics*, 2014, no.1, pp. 12-19. (Rus).

27. Sokol Ye.I., Kipenskii A.V., Krivosheev S.Yu. Educational and methodical work and research activities of the Department of Industrial and Biomedical Electronics of the National Technical University «KhPI». On the occasion of the 55-th anniversary of

the foundation. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: New solutions in modern technologies*, 2018, no.26(1302), vol.1, pp. 3-12. (Rus).

28. Dolbnja V.T., Sokol Ye.I., Krivosheev S.Yu. *Kafedra promyshlennoj i biomedicinskoj elektroniki NTU «KhPI». Istoriya. Dostizheniya. Perspektivy* [Department of Industrial and Biomedical Electronics NTU «KhPI» History. Achievements. Prospects]. Kharkiv, Golden Pages Publ., 2013. 224 p. (Rus).

Надійшла (received) 20.07.2018

Баранов Михайло Іванович¹, д.т.н., професор,
Розов Володимир Юрійович², д.т.н., чл.-кор. НАН України,
Сокол Євген Іванович³, д.т.н., чл.-кор. НАН України,

¹ НДПКІ «Молнія»

Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»,

61013, Харків, вул. Шевченко, 47,

тел/phone +380 57 7076841, e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

² Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму

Національної академії наук України»,

61106, Харків, вул. Індустріальна, 19,

тел/phone +380 57 991190, e-mail: Rozov@nas.gov.ua

³ Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут»,

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,

тел/phone +380 57 7001564, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov¹, V.Yu. Rozov², E.I. Sokol³

¹ Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

² State Institution «Institute of Technical Problems

of Magnetism of the NAS of Ukraine»,

19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

³ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

To the 100th anniversary of the National Academy of Sciences of

Ukraine – the cradle of domestic science and technology.

Purpose. Preparation of short scientifically-historical essay about creation and development of the National Academy of Sciences (NAS) of Ukraine. **Methodology.** Known scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of scientific and technical information, touching creation and development of NAS of Ukraine and resulted in scientific monographs, journals and internet-reports. **Results.** A short scientifically-historical essay is presented about creation and development of NAS of Ukraine. The main scientific achievements of NAS of Ukraine in various fields of science are presented. It is pointed that a large scientifically-organizational contribution to these achievements brought by present President of NAS of Ukraine, Academician B.Ye. Paton, his 100th Birthday (27 November, 2018) coincides surprising appearance with the 100th anniversary of NAS of Ukraine. An important role of NAS of Ukraine in the development of society and international scientific and technical cooperation was noted. The results of scientific research, achieved over the past few years by the Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine (Kharkiv), as well as by the Institute of Ionosphere of the NAS and Departments of education and science (DES) of Ukraine (Kharkiv) are briefly presented. The research cooperation in the field of electrical engineering of NTU «KhPI» with scientific institutions of the NAS of Ukraine is highlighted. **Originality.** Certain systematization is executed of known from scientific journals and other mass of scientific and technical materials, touching the results of activity of research workers of institutes of NAS of Ukraine in the last few years. **Practical value.** Scientific popularization and deepening for the students of higher school, engineer-technical and scientific workers, working in the different sectors of economy of country, scientific and technical knowledge in an area of physical-technical and mathematical sciences, chemical and biological sciences, and also social and humanitarian sciences, extending their scientific range of interests and further development of scientific and technical progress in society. References 28, figures 10.

Key words: National academy of Sciences of Ukraine, history of creation and development of Academy.

В.М. Золотарев

ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ»: ВЕХИ ПУТИ (75 лет заводу «Южкабель»)

З історією створення і розвитку заводу «Південкабель» пов'язане становлення вітчизняної кабельної промисловості. Підприємство є флагманом галузі. Його виробничий потенціал і номенклатура продукції, що випускається, свідчать про унікальні можливості цього виробництва. Таким завод став завдяки системному підходу до технічного переозброєння наявних потужностей, який тут триває протягом останніх десятиріч. Сучасне технологічне обладнання, нові цеха і ділянки забезпечують виготовлення конкурентоздатної продукції, яка користується попитом як в Україні, так і за кордоном. Бібл. 5.

Ключові слова: історія заводу «Південкабель», кабель, кабельна продукція.



С историей создания и развития завода «Южкабель» связано становление отечественной кабельной промышленности. Предприятие – флагман отрасли. Его производственный потенциал и номенклатура выпускаемой продукции свидетельствуют об уникальных возможностях этого производства. Таким завод стал благодаря системному подходу к технологическому перевооружению существующих мощностей, который здесь длится на протяжении последних десятилетий. Современное технологическое оборудование, новые цеха и участки обеспечивают изготовление конкурентоспособной продукции, пользующейся спросом как в Украине, так и за границей. Библ. 5.

Ключевые слова: история завода «Южкабель», кабель, кабельная продукция.

Сегодня завод «Южкабель» – лидер кабельной отрасли Украины. Перерабатывает 40 % от общего объема цветных металлов, используемых в отечественной кабельной промышленности [1]. Входит в десятку крупнейших в СНГ производителей кабельной продукции, является ведущим среди машиностроительных предприятий Харькова по выпуску товарной продукции [2]. Ежегодно заводом реализуется кабельных изделий на сумму более 60 млн. долларов США.

Современным, динамично развивающимся заводом «Южкабель» стал не сразу. Этому предшествовали 75 лет кропотливого труда многих поколений южкбельщиков, которые строили первые цеха, осваивали выпуск кабелей и проводов, таких необходимых для фронта и победы.

Глядя на современный облик производственных корпусов Харьковского завода «Южкабель», тяжело поверить в то, что в те далекие военные и послевоенные годы все начиналось на заброшенной окраине города, где еще до Второй Мировой войны был заложен фундамент цехов предприятия № 332 радиотехнической промышленности – филиала Харьковского электромеханического завода.

Для создания крупного предприятия в Харькове, получившего номер 804, Всесоюзным управлением «Главкабель» была назначена группа руководителей – директор завода Г.А. Зыбин, главный инженер В.И. Юзёфов и два опытных, квалифицированных инженера Н.В. Кудрявцев и Н.Н. Гарниер.

Пробную продукцию новое предприятие выпустило 7 марта 1944 года. Эти несколько десятков килограммов обмоточных и эмальпроводов были первой опытной продукцией, столь необходимой для фронта и восстанавливающихся в Украине промышленных предприятий. Люди радовались этому событию как чему-то необыкновенному.

К началу 1946 года завод уже имел 286 единиц различного оборудования. Кроме трех основных цехов ввели в эксплуатацию еще и собственный лакокрасочный участок, фильерную мастерскую. Как ни сложно было, создали еще и центральную заводскую лабораторию для осуществления входного контроля сырья и испытания готовой продукции.

Учитывая особую важность продукции завода для строительства предприятий и жилья в стране, 9 мая 1951 года Совет Министров СССР пересмотрел и утвердил новый технический паспорт завода, после чего строительство набрало ускорения. Почти сразу началось сооружение корпуса № 2 – цеха обмоточных проводов и корпуса № 4 – цеха силовых кабелей.

В 1954 году их сооружение было завершено. Оборудование, в основном импортное, поступало по графику и сразу монтировалось на производственных площадках.

В советский период все старания трудового коллектива были направлены на выполнение государственного плана. Экспорт продукции составлял весомую часть товарного выпуска. Качество кабелей с маркой «Завод «Южкабель»» особо ценилось во многих странах мира.

Около 20 % общего объема выпускаемой продукции экспортировалось на Кубу, в Аргентину, Вьетнам, Монголию, Индию, Иран, Ирак, Сирию, Египет, Румынию, Анголу, ЮАР и многие другие страны мира. К примеру, эмальпровода в большом количестве отгружались во Вьетнам, а силовые кабели – в Индию. В 1956 – 1959 годах в Бхилаи (штат Мадхьяпрадеш, Индия) СССР строил металлургический завод. Практически все силовые кабели, используемые на этом объекте, были с маркой «Завод «Южкабель»».

Тогда руководство предприятия уделяло особое внимание развитию цеха силовых кабелей как перспективному направлению. Цех был одним из первых в стране, где установили уникальный гидравлический пресс отечественного производства для наложения алюминиевых оболочек П-958, смонтировали новые, взамен старых, бумагоизолирующие машины ИЖ-32Э и крутильно-изолирующие машины, экструзионные прессы для наложения пластмассовых оболочек на силовые кабели «Андуард-150» и «Андуард-200» и бронировочные машины. Это оборудование позволяло значительно увеличить производительность труда.

В 1978 году был сдан в эксплуатацию цех товаров народного потребления (ТНП), который по тех-

© В.М. Золотарев

нической оснащенности и организации производства был к тому времени передовым. Он заменил небольшой участок ТНП в составе цеха сигнально-блокировочных кабелей. Благодаря этому завод смог наладить изготовление удлинителей, различных разъемов, переходников, выключателей, отличающихся высоким качеством и надежностью, пользовавшихся повышенным спросом не только у харьковчан.

В этом же году заводом были построены очистные сооружения, такие необходимые для очистки промышленных сточных вод. Предприятие стало одним из первых в Харькове, которое ввело в эксплуатацию такой природоохранной объект.

Кризисные 80-е и 90-е годы внесли определенные коррективы в планы технического развития завода. Они стали своеобразным экзаменом, который коллектив вынужден был сдавать. Разрушенная плановая система поставки сырья и материалов, сбыта готовой продукции заставила коллектив искать собственные пути решения возникающих проблем. Приходилось не только самостоятельно разрабатывать и монтировать необходимое оборудование, но и самим создавать новые конструкции кабелей, которые так необходимы потребителям. К примеру, в то время непосредственно специалистами завода был успешно освоен выпуск проводов для водо- и нефтепогружных насосов.

Стремясь сохранить предприятие, в начале 90-х годов трудовой коллектив переходит на арендные отношения, а затем, в 1995 году, инициирует изменение формы хозяйственной деятельности – выкуп предприятия как целостного имущественного комплекса.

В сентябре 1995 года прошло собрание, на котором труженики завода решили создать закрытое акционерное общество «Завод «Южкабель».

Акционирование завода трудовым коллективом дало мощный толчок развитию его производственного потенциала. Инициатива, неравнодушие к происходящему, добросовестность, трудолюбие каждого работника, умноженные на общие цели, вскоре дали положительные результаты. Предприятие преодолело кризис и стало стремительно развиваться. В это время была разработана стратегия и тактика технического перевооружения кабельного производства.

Первыми в рамках этого плана ввели в эксплуатацию алюминиевый пресс ПО-741, упростивший процесс изготовления токопроводящих жил силовых кабелей, и высокопроизводительный волочильный стан «Синхро».

Вскоре, без всяких инвестиций извне, завод смог приобрести у известной австрийской фирмы «MAG» два эмельагрегата. Новые агрегаты технически совершенные, намного производительнее, экологически безопаснее, чем оборудование, которое было демонтировано на предприятии несколько лет назад. Таким образом завод восстановил данное производство уже на совсем ином – современном уровне.

Необходимо подчеркнуть, что техническим перевооружением занимались и продолжают активно заниматься все службы и подразделения, все специалисты компании, начиная от проектирования и заканчивая монтажными и пуско-наладочными работами. С 2003 года на заводе практически ежегодно вводятся в эксплуатацию новые производства – новый цех или участок, новое оборудование [3].

Именно в этом году был успешно реализован масштабный проект по организации производства силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 110 кВ стоимостью \$9,4 млн. В его рамках на территории завода был построен новый цех площадью 5000 м².

Было приобретено и введено в эксплуатацию высокотехнологичное оборудование:

- универсальная крутильная машина типа DRUM TWISTER фирмы «Pourtier» (Франция);
- наклонная линия непрерывной вулканизации фирмы «Troester» (Германия);
- машина для скрутки токопроводящих жил кабелей фирмы «Cortinovis» (Италия);
- экструзионная линия для наложения оболочек фирмы «Troester» (Германия);
- испытательное оборудование фирм «Hipotronics» (США) и «Haefely» (Швейцария);
- крутильная машина фирмы «Cortinovis» (Италия), на которой впервые в СНГ было освоено промышленное производство уплотненных токопроводящих жил сечением до 800 мм² с продольной герметизацией от распространения влаги водоблокирующими нитями. Эта технология позволила значительно повысить надежность и улучшить эксплуатационные характеристики силовых кабелей на среднее и высокое напряжение.

Реализация данного проекта в 2003 году позволила отказаться от импорта в Украину дорогостоящих кабелей всемирно известных производителей, таких как «Nexans», «Prysmian», «Telefonika».

В то время некоторые кабельные заводы СНГ только начинали работать в этом направлении, а мы уже имели готовое действующее производство по выпуску кабелей напряжением до 110 кВ и сечением жилы до 800 мм². Кабели этих марок на сегодня наиболее востребованы в мире, надежны в эксплуатации и более простые при монтаже и обслуживании [4, 5].

Как раз за разработку и внедрение в серийное производство с 2003 года отечественных кабелей среднего и высокого напряжения (6 – 110 кВ) в 2007 году была присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники генеральному директору завода «Южкабель», кандидату технических наук В.М. Золотареву, кандидатам технических наук, главному инженеру В.П. Карпушенко и ведущим специалистам компании – Ю.А. Антонцу, Л.Г. Василец и А.Ф. Кривенко. Это стало признанием заслуг южкабельщиков в обеспечении энергобезопасности национальной экономики.

В 2004 году коллектив реализовал второй инвестиционный проект по созданию производства волоконно-оптических кабелей связи. Было приобретено оборудование, изготовленное фирмой «Nextrom» (Финляндия – Швейцария). Это линия окраски оптического волокна, линия изготовления оптического модуля, линия SZ-скрутки, экструзионная линия для наложения на кабель защитных оболочек, линия для перемотки кабеля и комплект испытательного оборудования. Отдельные узлы линий дополнительно комплектовались оборудованием фирм «Weber & Scheg» (США), «Medek & Schörner» (Австрия), «Sikora» (Германия) и других ведущих фирм. В состав оборудования также вошла крутильная машина фирмы

«Proton & Products» (Великобритания) для наложения на кабель проволоочной брони.

По разработанному заводом техническим условиям начался выпуск широкой гаммы волоконно-оптических кабелей, которые в полной мере отвечали разнообразным запросам потребителей.

Проектная мощность нового цеха составила 8000 километров волоконно-оптического кабеля в год.

В 2006 году был введен в эксплуатацию цех по выпуску самонесущих и защищенных проводов типа СИП. Эти провода предназначены для передачи и распределения электрической энергии в воздушных линиях, а также для ответвлений к вводам в жилые дома и хозяйственные постройки.

Использование в этом цехе оборудования ведущих европейских фирм позволило поднять качество выпускаемых самонесущих изолированных проводов до требований международных стандартов. В частности, освоено изготовление несущей жилы с применением высокопрочного алюминиевого сплава. Он пришел на смену традиционным конструкциям подбных проводов, упрочненных стальной проволокой. Такой сплав используется в СИПах, которые экспортируются в страны ближнего и дальнего зарубежья

С увеличением номенклатуры выпускаемых кабельных изделий возникла необходимость организации на заводе собственного производства современных изоляционных материалов. Для этого был создан научно-технический центр, работники которого вместе со специалистами центральной заводской лаборатории разрабатывают материалы для изоляции, заполнения и оболочек, в том числе специальных рецептур.

Параллельно с такими научно-исследовательскими работами велась подготовка к размещению на предприятии производства по переработке полимерных материалов и отработка рецептур отдельных материалов для применения в цехах волочения и сигнально-блокировочных кабелей, а также силовых кабелей. Создание нового цеха со сложным технологическим циклом заняло у завода несколько лет. Кропотливая работа инженерных служб в этом направлении увенчалась успехом. Сегодня завод «Южкабель» имеет цех по переработке полимерных материалов, аналогом которого нет на других кабельных заводах. Здесь проводятся работы, начиная от научно-исследовательских и лабораторных и заканчивая промышленным изготовлением готовой продукции.

Для этого установлены:

- линия фирмы «Реркон» (Турция) по изготовлению изоляционных и шланговых композиций ПВХ пластиката;

- многофункциональное оборудование фирмы «Егтафа» (Германия) для изготовления композиций полиолефинов (в том числе силанольно-сшиваемых, светостабилизированных, пожаробезопасных). Линия оснащена компьютеризованным управлением технологическим процессом, включая системы составления рецептур, транспортировки и дозирования ингредиентов полимерных композиций, поддержания параметров технологического процесса, системы дегазации летучих продуктов;

- оборудование для изготовления высоконаполненных ПВХ и безгалогенных полиолефиновых композиций фирмы «Х-Compound» (Швейцария). С за-

пуском этого оборудования завод смог полностью обеспечить собственное производство высоконаполненными и безгалогенными компаундами.

Оснащение цеха по переработке полимерных материалов прогрессивным оборудованием дало возможность использовать здесь и силаны. Это позволило цеху выйти на совершенно новый уровень в своем развитии. Ведь таких высокотехнологичных производств немного в странах СНГ. Они требуют не только достаточных инвестиций, но еще и квалифицированного персонала, способного освоить передовые технологии и в дальнейшем работать на особо сложном оборудовании.

Экономический анализ свидетельствует, что цены разработанных на заводе композиций полиолефинов на 5 – 20 % ниже, чем у других производителей аналогичной продукции. Это дает возможность снизить стоимость продукции завода «Южкабель» в целом и, таким образом, получить определенные преференции при ее продаже.

Кроме производства изоляционных материалов завод организовал еще и изготовление из катодной меди круглой бескислородной заготовки методом восходящего литья ведущей европейской фирмы «Urcast» (Финляндия), которое позволяет изготавливать до 10 тысяч тонн заготовки в год диаметром от 8 до 20 мм.

Эта технология, имеющая уже почти 50-летнюю историю, оказалась хорошим выбором для многих изготовителей кабелей и проводов различного применения. В настоящее время в мире работает более 130 установок по производству бескислородной медной катанки с использованием метода непрерывного восходящего литья.

Этот участок способен обеспечить стопроцентный переход основных цехов завода на использование заготовки меди собственного производства. Производительность установки может гибко варьироваться с учетом потребностей.

В 2008 году завод «Южкабель» успешно реализовал один из самых своих амбициозных проектов: силами заводчан был построен новый, оснащенный высокотехнологичным оборудованием, цех по изготовлению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 330 кВ включительно.

Строительство нового производства стало закономерным результатом реакции специалистов завода на мировые тенденции развития как отечественной, так и мировой энергосистем. С каждым годом возрастает спрос на силовые кабели высокого и сверхвысокого напряжения. Это связано с реализацией крупных проектов в энергетике, металлургии, горнодобывающей промышленности и при строительстве мегаполисов. Прокладка таких кабельных линий дает возможность заменить воздушные ЛЭП, что позволяет экономить электроэнергию, обеспечивать надежность ее передачи.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена уже давно широко применяются в энергосистемах экономически развитых стран. Так, в США 85 % силовых кабелей имеют полиэтиленовую изоляцию, в Финляндии, Франции, Швеции, Германии и Японии используют кабели только с полиэтиленовой изоляцией. Ряд энергосистем России, Украины и других стран СНГ тоже использует такие кабели.

На новом участке специалистами завода были установлены:

- линия наложения элементов экранов на кабели типа «DRUM TWISTER» производства фирмы «Pourtier» (Франция);
- две линии грубого волочения медной и алюминиевой проволоки фирмы «Niehoff» (Германия);
- линия перемотки и наложения бронепокровов из стальных лент фирмы «Pourtier» (Франция);
- наклонная линия непрерывной вулканизации фирмы «Maillefer» (Финляндия);
- машина скрутки токопроводящих жил из алюминия и меди фирмы «Seeco-Bartell» (США);
- линия наложения наружной оболочки фирмы «Maillefer» (Финляндия);
- испытательное оборудование, включающее в себя два модульных реактора, каждый из которых обеспечивает величину испытательного напряжения 250 кВ, фирм «Hipotronics» (США) и «Haefely» (Швейцария).

Специалистами завода была выбрана энергообеспечивающая технология испытаний повышенным напряжением на основе последовательного резонанса с использованием испытательной установки именно этих фирм. Сегодня такой мощной установкой в Украине располагает только завод «Южкбель». На ней также осуществляются испытания по измерению уровня частичных разрядов в каждой строительной длине кабелей, определяется тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции, электрическое сопротивление жилы и изоляции.

Для организации такого сложного производства заводом был построен новый корпус площадью 12000 м². Это единственное такое высокотехнологичное и наукоемкое производство на территории СНГ мощностью 2000 километров кабеля в год с учетом специализации цеха на выпуск кабелей высокого и сверхвысокого напряжения.

Объем освоенных капитальных вложений с момента начала строительства нового цеха составил 20 миллионов долларов США.

В сентябре 2010 года завод изготовил и испытал 8,6 километров силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 330 кВ для Березовской ГРЭС (Республика Беларусь). Такой кабель в странах СНГ был впервые изготовлен именно на заводе «Южкбель».

А в начале 2011 года уже завершились все работы по прокладке, монтажу и вводу в эксплуатацию первой в Республике Беларусь кабельной линии на напряжение 330 кВ.

В нынешнем году заводом «Южкбель» уже изготовлено и поставлено 9,5 километров силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена с алюминиевой токопроводящей жилой сечением 2000 мм² на напряжение 220 кВ для подстанции «Кременская», что в Луганской области. В результате боевых действий в регионе были повреждены магистральные и распределительные электросети. Ввод в эксплуатацию указанной подстанции с кабельной системой завода «Южкбель» позволит синхронизировать систему электроснабжения севера Донбасса с объединенной энергосистемой Украины, которая раньше работала с пониженной генерацией Луганской ТЭС. Ввод в эксплуатацию подстанции даст возмож-

ность Северодонецкому объединению «Азот» и Лисичанскому нефтеперерабатывающему заводу работать на полную мощность.

Кабели сверхвысокого напряжения успешно прошли испытания в Европейском испытательном центре фирмы «КЕМА» (Голландия), заводом получены международные сертификаты качества.

Работать для потребителей, учитывать их пожелания и потребности – вот то правило, которым руководствуется наша компания в своей деятельности.

К примеру, в Украине увеличился спрос на обмоточные провода. Чтобы удовлетворить этот спрос завод приобрел современную, высокопроизводительную двухходовую машину фирмы «Newtech» (Италия). В кратчайшие сроки смонтировал ее, осуществил пусконаладочные работы и освоил выпуск проводов со стекловолоконной изоляцией. Провода, изготовленные на этой машине, имеют более высокие эксплуатационные характеристики и надежность.

Завод «Южкбель» принимает активное участие в общегосударственной программе по импортозамещению. Увеличивая номенклатуру выпускаемых кабелей, предпринимая тем самым предоставление возможности потребителям на украинском рынке выбирать между аналогичной импортной и отечественной продукцией, которая подчас по качеству значительно лучше зарубежной и по цене конкурентоспособна.

Именно в рамках этой программы завод приобрел новое оборудование для изготовления низковольтных пожаробезопасных кабелей и гибких бытовых проводов:

- у фирмы «Niehoff» (Германия) 8-ручьевую волочильную машину ММН 121 для волочения медной проволоки в диапазоне диаметров 0,20 – 1,13 мм и три машины двойной скрутки D631 и D1001 для производства высококачественной гибкой жилы сечением 0,5 – 35 мм²;

- у фирмы «Rosendahl» (Австрия) две универсальных линии, предназначенные для изолирования токопроводящих жил сечением 0,50 – 35 мм² и для их скрутки методом «SZ-скрутки» с одновременным наложением внутренней и наружной оболочки.

Завод получил сертификаты Института испытаний и сертификации VDE (Германия), Института Innogy SE Eurotest (Германия) и исследовательского Института энергетики IEn (Польша). Благодаря проведенной огромной работе по адаптации кабелей и проводов с маркой «Завод «Южкбель» к зарубежным стандартам и требованиям сегодня предприятие экспортирует свою продукцию в страны СНГ, Европейского Союза, а также в страны Юго-Восточной Азии и Ближнего Востока.

Наше предприятие продолжило свое активное участие в общегосударственной программе импортозамещения. Было принято решение расширить номенклатуру выпускаемой продукции за счет изготовления кабелей специального назначения, востребованных на объектах атомной энергетики, предприятиях транспортного машиностроения, а также используемых в ответственных системах пожарной сигнализации и пожаротушения.

На протяжении 2015 – 2016 г.г. завод заключил контракты с ведущими зарубежными компаниями на поставку специального технологического оборудования:

- линии по изготовлению медной проволоки с покрытием оловом методом электролитического лужения;
- двух высокоскоростных лентобмоточных машин для наложения изоляции из стеклослюдинитовых лент на токопроводящие жилы. Внедрение их в производство позволяет предприятию, в первую очередь, освоить выпуск огнестойких контрольных кабелей малых сечений с токопроводящими жилами из нелуженной и луженной меди, а также из термопарных сплавов;
- двух оплеточных машин и одного тростильного станка для изготовления медных и медных луженных проволочных экранов.

Нормативная документация на изготовление кабелей специального назначения работниками завода была разработана, согласована и утверждена. Совместно с представителями государственного центра ядерной безопасности, ГП НАЭК «Энергоатом» и представителями трех АЭС Украины успешно проведены приемочные испытания опытных партий новой продукции. А это кабели контрольные, управления и малогабаритные, которые обладают рядом технических преимуществ по помехозащищенности, пожаробезопасности и стойкости к коррозии по сравнению с традиционно применяемыми кабелями.

Учитывая пожелания потребителей и стремительное развитие солнечной энергетики в стране, специалисты предприятия разработали конструкцию и в сжатые сроки освоили производство кабелей для фотоэлектрических систем (солнечных электростанций). Это одножильные кабели с гибкой медной луженой жилой. Изоляция и оболочка этих кабелей выполнены из безгалогенного сшитого материала.

Общий объем инвестиций в производство завода за последние годы составил более 3 млрд грн.

Реализация проектов по техническому перевооружению производства во многом стала возможна благодаря многолетнему тесному деловому сотрудничеству специалистов завода с НТУ «ХПИ», в частности, с кафедрой электроизоляционной и кабельной техники, а также с коллективом Института электродинамики НАН Украины.

Сегодня предприятие выпускает около 25 тысяч маркоразмеров различных кабелей, проводов и шнуров. Завод «Южкабель» – узнаваемый бренд. Компанию хорошо знают в странах ближнего и дальнего зарубежья. У завода устойчивая кредитно-финансовая история. Завод «Южкабель» является одним из основных участников Международных ассоциаций «Электрокабель» и «Интеркабель», в которые входят компании – мировые лидеры по изготовлению кабелей и проводов, высокотехнологичного оборудования, производители сырья и материалов для кабельной промышленности.

Основу стабильного развития завода «Южкабель» составляют успешно функционирующие на производстве система менеджмента качества в соответствии с требованиями стандарта ИСО 9001 и система экологического менеджмента в соответствии с требованиями стандарта ИСО 14001, которые прошли ресертификацию по новой версии стандартов 2015 года.

Главное богатство завода – это его трудовой коллектив. 75-летняя история завода свидетельствует о том, что южкабельщики всегда успешно решали и

будут решать впредь возникающие перед ними задачи, добиваясь поставленных целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотарев В.М., Жерновников В.М., Карпушенко В.П., Кривенко А.Ф., Кудрявцева Р.И. Заводу «Южкабель» 60: Страницы истории трудового коллектива / под ред. В.М. Золотарева. – Харьков: Майдан, 2003.
2. Золотарев В.М. Заводу «ЮЖКАБЕЛЬ» – семьдесят лет // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2013. – №4. – С. 4-9. doi: 10.20998/2074-272X.2013.4.01.
3. Золотарев В.В., Щерба М.А., Гурын А.Г., Супруновская Н.И., Чопов Е.Ю., Обозный А.А. *Електротехнологічний комплекс виробництва кабельних систем на напругу до 400 кВ*. – Киев: Про формат, 2017. – 594 с.
4. Золотарев В.М. Публичному акционерному обществу «Завод Южкабель» – 70 лет // *Кабели и провода*. – 2013. – №4. – С. 34-35.
5. Антонен Ю.А. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 20 кВ для распределительных сетей электроэнергетических систем // *Электрические сети и системы*. – 2016. – №4, 5. – С. 37-41.

REFERENCES

1. Zolotaryov V.M., Zhernovnykov V.M., Karpushenko V.P., Kryvenko A.F., Kudryavtseva R.I. *Zavodu «Yuzhkabel» 60: Stranitsy istorii trudovogo kolektiva* [Yuzhcable works 60: history pages of the labor collective]. Kharkiv, Maydan Publ., 2003. (Rus).
2. Zolotaryov V.M. The seventy years history of plant «Yuzhcable». *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.4, pp. 4-9. doi: 10.20998/2074-272X.2013.4.01.
3. Zolotaryov V.M., Shcherba M.A., Guryn A.G., Suprunovska N.I., Chopov E.Yu., Oboznyy A.A. *Elektrotekhnologicheskii kompleks proizvodstva kabel'nykh sistem na napriazhenie do 400 kV* [Electrotechnological complex of production of cable systems for voltage up to 400 kV]. Kyiv, Pro Format Publ., 2017. 594 p. (Rus).
4. Zolotaryov V.M. Private Joint-stock company Yuzhcable works – 70 years. *Cables and wires*, 2013, no.4, pp. 34-35. (Rus).
5. Antonets Yu.A. Power cables with XLPE insulation for voltage 20 kV for distribution networks of electric power systems. *Electrical networks and systems*, 2016, no.4-5, pp. 37-41. (Rus).

Поступила (received) 10.08.2018

Золотарев Владимир Михайлович, д.т.н., проф., генеральный директор ПАО «Завод Южкабель», ПАО «ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ», 61099, Харьков, ул. Автогенная, 7, тел/phone +380 57 7545248, e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

V.M. Zolotaryov

Private Joint-stock company Yuzhcable works, 7, Avtogennaya Str., Kharkiv, 61099, Ukraine.

Plant «Yuzhcable works»: milestones of the road (75 years to Plant «Yuzhcable works»).

With the history of the creation and development of the Plant «Yuzhcable works», the formation of the national cable industry is connected. The enterprise is the flagship of the industry. Its production potential and the range of products demonstrate the unique capabilities of this production. Such a plant has become thanks to a systematic approach to the technical re-equipment of existing facilities, which has been going on here for the last decades. Modern technological equipment, new workshops and sites ensure the production of competitive products that are in demand both in Ukraine and abroad. References 5.

Key words: history of the plant «Yuzhcable works», cable, cable products.

В.Ф. Болух, Ю.В. Кашанский, А.И. Кочерга, И.С. Щукин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА С ДВОЙНЫМ ЯКОРЕМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ УНИЧТОЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА SSD НАКОПИТЕЛЕ

За допомогою математичної моделі, яка враховує взаємопов'язані електричні, магнітні, теплові та механічні процеси досліджено вплив геометричних параметрів на електродинамічні характеристики та показники лінійного імпульсного електроmechanічного перетворювача (ЛЕП) індукційного типу з подвійним якорем, який охоплює індуктор з протилежних сторін. При аксіальному віддаленні задньої частини якоря від індуктора максимальні щільності струмів в індукторі зменшуються, в передній частині якоря збільшуються, а в задній частині якоря зменшуються. Максимальна величина та імпульс електродинамічних зусиль (ЕДЗ) між частинами якоря зменшуються. При збільшенні числа витків індуктора та зменшенні товщини мідної шини відбувається підвищення усіх основних показників ЛЕП. При збільшенні числа витків індуктора від 26 до 56 максимальна величина ЕДЗ, що діє між частинами якоря, підвищується практично у 3 рази, а величина імпульсу ЕДЗ – в 3,3 рази. При збільшенні ширини мідної шини індуктора відбувається зниження основних показників ЛЕП. При збільшенні ширини індуктора від 10 мм до 20 мм максимальна величина ЕДЗ між частинами якоря знижується у 1,3 рази, а величина імпульсу ЕДЗ знижується в 1,2 рази. На основі виконаних досліджень був розроблений та експериментально випробуваний зразок ЛЕП індукційного типу з подвійним якорем, що призначений для знешкодження інформації, яка розміщена на SSD накопичувачі. Бібл. 14, рис. 9.

Ключові слова: лінійний імпульсний електроmechanічний перетворювач індукційного типу, подвійний якорь, електродинамічні процеси, цифровий SSD накопичувач, експериментальний зразок.

При помощи математической модели, учитывающей взаимосвязанные электрические, магнитные, тепловые и механические процессы исследовано влияние геометрических параметров на электродинамические характеристики и показатели линейного импульсного электроmechanіческого преобразователя (ЛИЭП) индукционного типа с двойным якорем, охватывающим индуктор с противоположных сторон. При аксиальном удалении задней части якоря от индуктора максимальные плотности токов в индукторе уменьшаются, в передней части якоря увеличивается, а в задней части якоря уменьшается. Максимальная величина и импульс электродинамических усилий (ЭДУ) между частями якоря уменьшаются. При увеличении числа витков индуктора и уменьшении толщины медной шины происходит увеличение всех основных показателей ЛИЭП. При увеличении числа витков индуктора от 26 до 56 максимальная величина ЭДУ, действующая между частями якоря, возрастает практически в 3 раза, а величина импульса ЭДУ в 3,3 раза. При увеличении ширины медной шины и ширины индуктора происходит уменьшение основных показателей ЛИЭП. При увеличении ширины индуктора от 10 мм до 20 мм максимальная величина ЭДУ между частями якоря уменьшается в 1,3 раза, а величина импульса ЭДУ уменьшается в 1,2 раза. На основании проведенных исследований был разработан и экспериментально испытан образец ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем, предназначенный для уничтожения информации, размещенной на цифровом SSD накопителе. Библ. 14, рис. 9.

Ключевые слова: линейный импульсный электроmechanіческий преобразователь индукционного типа, двойной якорь, электродинамические процессы, цифровой SSD накопитель, экспериментальный образец.

Введение. Линейные импульсные электроmechanіческие преобразователи (ЛИЭП) индукционного типа широко применяются для создания ударно-механических импульсов [1-4]. Такие преобразователи используются во многих отраслях науки и техники в качестве ударно-силовых устройств. В строительстве применяются электромагнитные молоты и перфораторы; в горной промышленности – бутобой и вибраторы; в геологоразведке вибростейсмостойники; в машиностроении – молоты с большим диапазоном энергии удара и устройства для электродинамической обработки сварных соединений; в химической и медико-биологической промышленности – вибростейсмостойники, дозаторы и др. ЛИЭП применяются в испытательных комплексах для проверки ответственной аппаратуры на ударные нагрузки, в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов [4-6]. Одним из перспективных направлений является применение ЛИЭП для уничтожения информации на цифровых носителях при несанкционированном доступе [7]. Такие ЛИЭП должны обла-

дать высоким быстродействием и коротким рабочим циклом, ограниченными массогабаритными показателями, автономностью и развивать высокие ударно-механические нагрузки. Задача приобретает повышенную сложность при уничтожении информации, распределенной по поверхности плоского твердотельного SSD накопителя [8].

Наиболее перспективным для решения данной задачи является ЛИЭП индукционного типа, в котором электропроводящий якорь электродинамически взаимодействует с неподвижным индуктором [4, 9, 10]. При возбуждении многовиткового индуктора от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) в электропроводящем якорю индуцируются вихревые токи. Вследствие этого на якорь действуют электродинамические усилия (ЭДУ) отталкивания, вызывающие его аксиальное перемещение вместе с ударным исполнительным элементом (бойком) относительно индуктора.

Однако при быстром изменении электромагнитных, механических и тепловых параметров силовые показатели ЛИЭП индукционного типа традиционной

конструкции недостаточно высоки [4]. Одним из путей повышения указанных показателей является разработка новых конструкций ЛИЭП. Поскольку в традиционной конструкции ЛИЭП с якорем индукционно взаимодействует только одна сторона индуктора, то значительная часть магнитного поля с противоположной стороны индуктора рассеивается в окружающее пространство, негативно влияя на близко расположенные электронные и биологические объекты, и не используется для создания дополнительных ЭДУ.

Рассмотрим конструкцию ЛИЭП коаксиальной конфигурации, содержащую неподвижный индуктор 1 и двойной якорь, охватывающий индуктор с противоположных сторон [8] (рис. 1).

Передняя часть якоря (ПЧЯ) 2 и задняя часть якоря (ЗЧЯ) 3 выполнены в виде коаксиально установленных дисков, охватывающих индуктор с противоположных сторон. К ПЧЯ 2 присоединен боек 4, направленный в сторону объекта воздействия 5. ЗЧЯ 3 и объект воздействия 5 по наружной поверхности охвачены фиксирующими скобами 6. Заметим, что роль одной из частей указанного якоря может играть наружный электропроводящий экран [11].

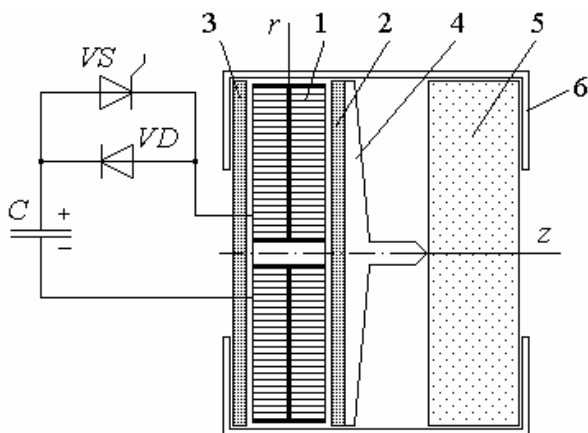


Рис. 1. ЛИЭП с двойным якорем:
1 – индуктор; 2 – ПЧЯ; 3 – ЗЧЯ; 4 – боек;
5 – объект воздействия; 6 – фиксирующие скобы

При поступлении сигнала на тиристор VS происходит возбуждение током неподвижного индуктора от ЕНЭ C и за счет возникающего магнитного поля в каждой из частей двойного якоря индуцируются вихревые токи. Вследствие этого на обе части двойного якоря со стороны индуктора действуют противоположно направленные ЭДУ отталкивания, что приводит к суммарному силовому воздействию бойка на объект воздействия. За счет использования диода VD возбуждение индуктора осуществляется разнополярным импульсом, при котором реализуется колебательно-затухающий характер изменения тока.

Однако при этом возникает вопрос о влиянии параметров индуктора и расположения частей двойного якоря на силовые показатели ЛИЭП.

Целью статьи является определение путей повышения силовых показателей линейного импульсного электрохимического преобразователя индукционного типа с двойным якорем, предназначенного для уничтожения информации в плоском твердотельном SSD накопителе.

Математическая модель. Рассмотрим математическую модель, которая описывает электрохимические процессы ЛИЭП с использованием сосредоточенных параметров активных элементов – индуктора, и подвижных частей двойного якоря. Электрические процессы можно описать системой уравнений:

$$i_1 R_1(T_1) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \sum_{n=2,3} \left(M_{1n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_n e_n \right); \quad (1)$$

$$\frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt = U_0; \quad (2)$$

$$i_n R_n(T_n) + L_n \frac{di_n}{dt} + M_{1n}(z) \frac{di_1}{dt} + M_{nm}(z) \frac{di_m}{dt} + i_n e_3 + i_m e_1 = 0; \quad (3)$$

где $p = 1, 2, 3$ – индексы индуктора, ПЧЯ и ЗЧЯ соответственно; $m = 5-n$; $n = 2, 3$; $e_1 = (v_{12}(t) + v_{13}(t)) \frac{dM_{23}}{dz}$;

$$e_2 = v_{13}(t) \frac{dM_{13}}{dz}; \quad e_3 = v_{12}(t) \frac{dM_{12}}{dz}; \quad R_p(T_p), L_p, i_p, T_p$$
 – со-

противление, индуктивность, ток и температура p -ого активного элемента соответственно; $M_{12}(z)$, $M_{13}(z)$, $M_{23}(z)$ – взаимоиנדуктивности между соответствующими p -ми активными элементами; $v_{13}(t)$, $v_{12}(t)$ – противоположно направленные скорости ЗЧЯ и ПЧЯ относительно индуктора вдоль оси z соответственно.

Решение уравнений (1) – (3) для токов в активных элементах представлено в работе [12].

Электродинамические процессы можно описать системой уравнений:

$$i_n \frac{dM_{1n}}{dz} = i_n i_m \frac{dM_{nm}}{dz} + (m_n + m_e) \frac{dv_{1n}}{dt} + K_T v_{1n}(t) + 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2\max}^2 v_{1n}^2(t) + K_p \Delta z_{1n}(t), \quad (4)$$

где $\Delta z_{13}(t)$, $\Delta z_{12}(t)$ – противоположно направленные перемещения ЗЧЯ и ПЧЯ относительно индуктора вдоль оси z ; m_2 , m_3 , m_e – масса ПЧЯ, ЗЧЯ и бойка соответственно; K_T – коэффициент динамического трения; γ_a – плотность среды перемещения; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления среды; $D_{ex\ m}$ – максимальный диаметр якоря; K_p – коэффициент жесткости объекта воздействия.

Перемещения ЗЧЯ и ПЧЯ относительно индуктора можно представить в виде рекуррентных соотношений:

$$\Delta z_{1n}(t_{k+1}) = \Delta z_{1n}(t_k) + v_{1n}(t_k) \Delta t + \frac{\Delta t^2}{2(m_n + m_e)} \times \left[\left(i_1(t_k) \frac{dM_{1n}}{dz} - i_2(t_k) \frac{dM_{nm}}{dz} \right) i_n(t_k) - K_T v_{1n}(t_k) - 0,125 \cdot \pi \cdot \beta_a \gamma_a D_{ex\ n}^2 v_{1n}^2(t_k) - K_p \Delta z_{1n}(t_k) \right]. \quad (5)$$

Методика расчета взаимосвязанных электрических, магнитных, тепловых и электродинамических процессов при учете различных нелинейных зависимостей описана в работе [12].

В качестве показателей ЛИЭП с двойным якорем будем использовать:

- амплитуду аксиального ЭДУ f_{z23m} , действующего на фиксирующие скобы от противоположно направленных сил на переднюю и заднюю части двойного

якоря $f_{z23m} = f_{z2m} - f_{z3m}$, где f_{z2m}, f_{z3m} – амплитуды ЭДУ, действующие на ПЧЯ и ЗЧЯ соответственно;

- величину импульса ЭДУ $F_{z23m} = F_{z2m} - F_{z3m}$, действующую на фиксирующие скобы от противоположно направленных сил на переднюю и заднюю части двойного якоря, где F_{z2m}, F_{z3m} – амплитуды ЭДУ, действующие на ПЧЯ и ЗЧЯ соответственно; импульс $F_z = \int f_z(t) dt$;

- максимальные значения плотностей токов в индукторе j_{1m} , ПЧЯ j_{2m} , и ЗЧЯ j_{3m} ;

- превышения температур индуктора $\theta_1 = T_1 - T_0$, ПЧЯ $\theta_2 = T_2 - T_0$, и ЗЧЯ $\theta_3 = T_3 - T_0$, где T_1, T_2, T_3 – температура индуктора, ПЧЯ и ЗЧЯ соответственно; T_0 – температура окружающей среды.

Основные параметры ЛИЭП. Рассмотрим ЛИЭП коаксиальной конфигурации, у которого обе части двойного якоря одинаковы и выполнены в форме плоского диска из технической меди, одна из сторон которого обращена к индуктору.

ЛИЭП имеет следующие исходные параметры:

Индуктор: внешний диаметр $D_{ex1}=100$ мм, внутренний диаметр $D_{in1}=10$ мм, высота $H_1 = 10$ мм, сечение медной шины $a \times b = 1,8 \times 4,8$ мм², количество витков шины $N_1 = 46$ шт. Индуктор выполнен в виде двухслойной обмотки с внешними электрическими выводами.

Части якоря: внешний диаметр $D_{ex2,3}=100$ мм, внутренний диаметр $D_{in2,3}=10$ мм, высота $H_{2,3}=3$ мм.

ЕНЭ: емкость $C=500$ мкФ, напряжение $U_0=1$ кВ.

Боек имеет массу $m_e=0,45$ кг; коэффициент жесткости объекта воздействия $K_p = 3 \cdot 10^7$ Н/м. Такая жесткость характерна для объекта воздействия типа, цифрового SSD накопителя при воздействии на него заостренного бойка.

Рассмотрим схему возбуждения, которая обеспечивает колебательно-затухающий характер изменения тока возбуждения индуктора, при котором реализуются наиболее высокие электродинамические показатели ЛИЭП (рис. 1) [13].

Электродинамические характеристики и показатели ЛИЭП с двойным якорем. Рассмотрим влияние геометрических параметров на электромеханические процессы ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем. На рис. 2 представлены плотности токов в индукторе j_1 и в обеих частях якоря $j_2=j_3$, величина f_{z23} и импульс F_{z23} ЭДУ, действующие между передней и задней частями двойного якоря для ЛИЭП с исходными параметрами.

В данном ЛИЭП токи в индукторе и якоре изменяются по колебательно-затухающему закону практически в противофазе. Максимальная величина плотности тока в индукторе составляет $j_{1m}=215,8$ А/мм², а в каждой из одинаковых частей двойного якоря – $j_{2m}=j_{3m}=299,7$ А/мм². ЭДУ имеют форму затухающих полярных импульсов, частота следования которых практически в 2 раза выше частоты колебания тока индуктора. Максимальная величина ЭДУ, действующей в противоположные стороны на переднюю и заднюю части двойного якоря, составляет $f_{z23m}=11,99$ кН. А величина импульса ЭДУ между частями двойного якоря составляет $F_{z23}=4,59$ Н·с. К концу действия

токовых импульсов превышение температуры индуктора составляет $\theta_1=0,4$ °С, а превышения температур частей якоря – $\theta_2 = \theta_3 = 0,17$ °С.

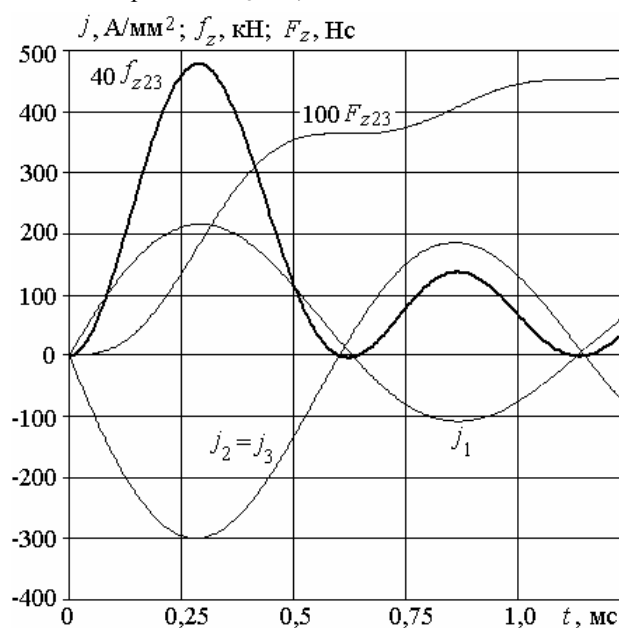


Рис. 2. Электродинамические характеристики ЛИЭП с исходными параметрами

При аксиальном удалении ЗЧЯ от индуктора на расстояние $\Delta z_{13}=6$ мм наблюдаются следующие изменения (рис. 3). Ток в ПЧЯ к концу первого полупериода несколько опережает ток индуктора, в то время как ток в ЗЧЯ находится с ним практически в противофазе. По сравнению с ЛИЭП с исходными параметрами в данном случае максимальная плотность тока в индукторе j_{1m} уменьшается в 1,06 раз, в ПЧЯ j_{2m} – увеличивается в 1,05 раз, а в ЗЧЯ j_{3m} – уменьшается в 1,92 раза. В результате этого максимальная величина ЭДУ, действующая на ПЧЯ f_{2m} увеличивается в 1,07 раз, на ЗЧЯ f_{3m} – уменьшается в 4,55 раз, что приводит к уменьшению суммарных усилий f_{z23m} в 1,55 раз.

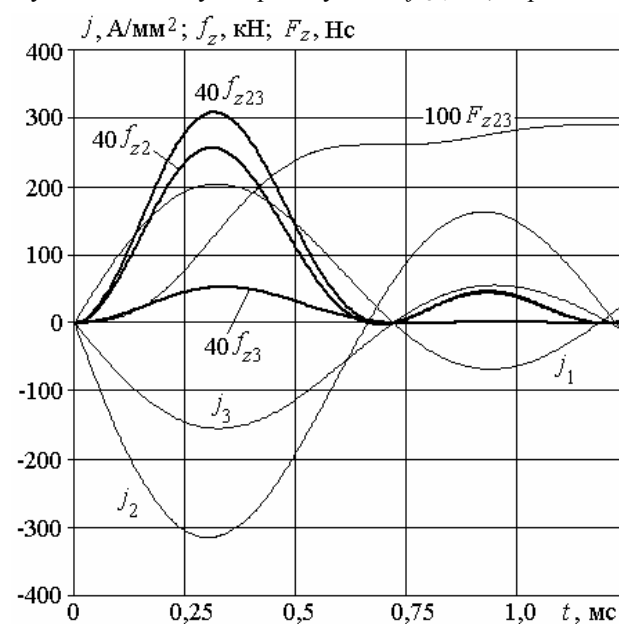


Рис. 3. Электродинамические характеристики ЛИЭП, у которого ЗЧЯ удалена на расстояние $\Delta z_{13}=6$ мм от индуктора

Импульс ЭДУ, действующий на ПЧЯ, F_{z2} увеличивается в 1,05 раз, на ЗЧЯ F_{z3} – уменьшается в 4,73 раз, что приводит к уменьшению суммарного импульса ЭДУ между частями якоря F_{z23} в 1,58 раз.

Для данного ЛИЭП превышение температуры индуктора θ_1 уменьшается в 1,33 раза, ПЧЯ θ_2 – увеличивается в 1,075 раз, а ЗЧЯ θ_3 – уменьшается в 4 раза.

На рис. 4 представлены зависимости электродинамических показателей ЛИЭП с двойным якорем при удалении ЗЧЯ от индуктора. При удалении ЗЧЯ от индуктора на расстояние 8 мм максимальные плотности в индукторе снижаются в 1,07 раз, в ПЧЯ – увеличивается в 1,1 раз, в ЗЧЯ – уменьшается в 2,91 раз.

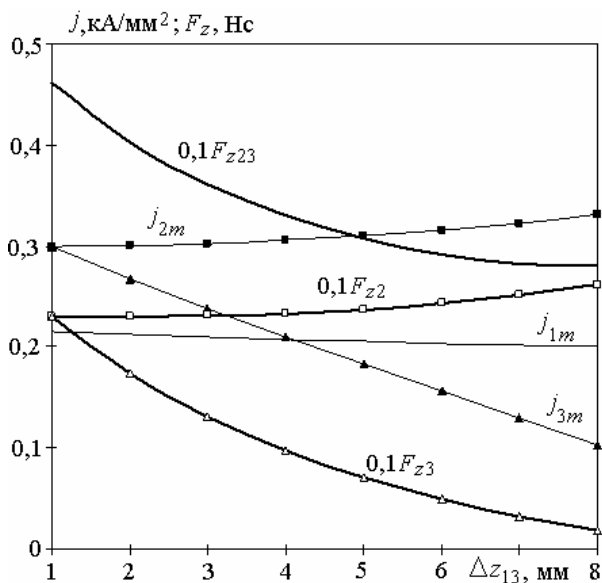


Рис. 4. Зависимость электродинамических показателей ЛИЭП от расстояния Δz_{13} между индуктором и ЗЧЯ

Максимальная величина ЭДУ, действующих на ПЧЯ f_{2m} , увеличивается в 1,17 раз, на ЗЧЯ f_{3m} – уменьшается в 13,12 раз, что приводит к уменьшению суммарных усилий f_{23m} в 1,62 раза. Импульс ЭДУ, действующих на ПЧЯ, F_{z2} увеличивается в 1,14 раз, на ЗЧЯ F_{z3} – уменьшается в 12,1 раз, что приводит к уменьшению суммарного импульса ЭДУ F_{z23} в 1,64 раз.

При этом превышение температуры индуктора θ_1 уменьшается в 1,16 раза, ПЧЯ θ_2 – увеличивается в 1,18 раз, а ЗЧЯ θ_3 – уменьшается в 6,63 раза.

Рассмотрим влияние геометрических параметров индуктора на показатели ЛИЭП с двойным якорем. Одним из таких показателей является толщина медной шины b , влияющая на число витков индуктора N_1 . Если шина имеет сечение $a \times b = 6,8 \times 2,6$ мм², то индуктор имеет $N_1 = 26$ витков. Если шина имеет сечение $a \times b = 6,8 \times 1,4$ мм², то индуктор имеет $N_1 = 56$ витков. При увеличении числа витков индуктора N_1 , а значит при уменьшении толщины медной шины b , происходит увеличение всех основных показателей ЛИЭП (рис. 5) При увеличении числа витков индуктора от 26 до 56 максимальная плотность тока в индукторе j_{1m} возрастает в 1,5 раз, а в обеих частях якоря $j_{2m} = j_{3m}$ – в 1,73 раза.

Это приводит к тому, что максимальная величина ЭДУ, действующая между частями якоря f_{23m} , возрастает практически в 3 раза, а величина импульса

ЭДУ F_{z23} – в 3,3 раза. Однако при этом происходит увеличение превышений температуры индуктора θ_1 в 2,82 раза, а обеих частей якоря $\theta_2 = \theta_3$ – в 3,37 раза к концу рабочего цикла.

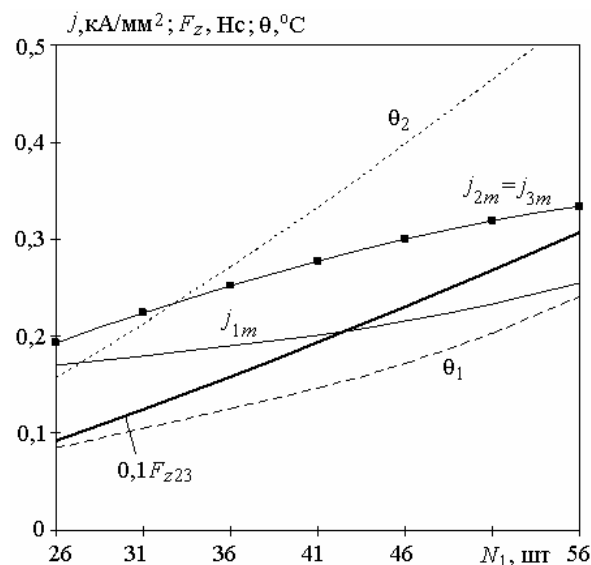


Рис. 5. Зависимость электродинамических и тепловых показателей ЛИЭП от числа витков индуктора N_1

При увеличении ширины медной шины, а значит и ширины индуктора, происходит уменьшение основных показателей ЛИЭП (рис. 6). При увеличении ширины медной шины a от 4,8 мм до 9,8 мм, а значит и ширины индуктора H_1 от 10 мм до 20 мм, можно отметить следующие закономерности. Максимальная плотность тока в индукторе j_{1m} уменьшается значительно (более чем 2 раза), а максимальные плотности токов в обеих частях якоря $j_{2m} = j_{3m}$ снижаются незначительно (в 1,1 раз). Максимальная величина ЭДУ f_{23m} между частями якоря уменьшается в 1,3 раза, а величина импульса ЭДУ F_{z23} уменьшается в 1,2 раза. При этом превышения температур индуктора θ_1 уменьшаются значительно (практически в 4 раза), а превышения температур якоря $\theta_2 = \theta_3$ уменьшаются незначительно (в 1,1 раз).

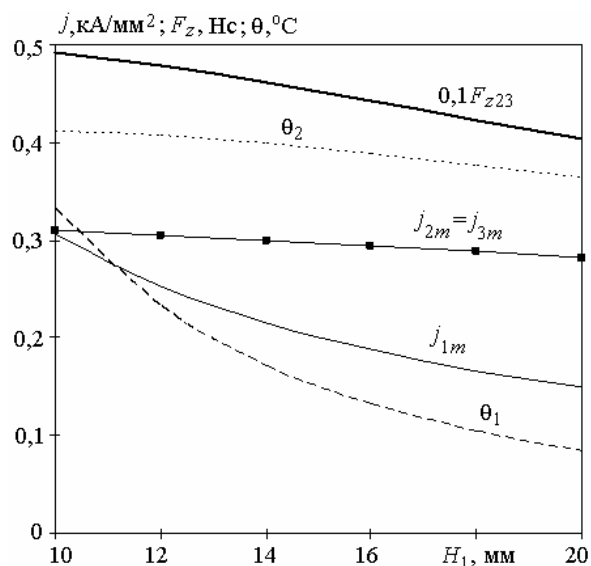


Рис. 6. Зависимость электродинамических и тепловых показателей ЛИЭП от ширины индуктора H_1

Конструкция и образец ЛИЭП для уничтожения информации на SSD накопителе. На основании проведенных исследований разработана конструкция ЛИЭП, предназначенного для уничтожения информации, размещенной на твердотельном цифровом SSD накопителе с распределенной по поверхности памятью [8].

Устройство содержит индуктор 1 в виде двух обмоток 1а и 1б с внешними электрическими выводами 2, между которыми расположена индукторная немагнитическая пластина 3 (рис. 7). Выполненные в форме овала обмотки индуктора 1 намотаны согласно по магнитному полю из единого ленточного провода и при помощи эпоксидной смолы соединены с индукторной пластиной 3.

Устройство содержит ПЧЯ 4 и ЗЧЯ 5. Индуктор 1 зафиксирован относительно объекта воздействия – цифрового SSD накопителя информации 6 при помощи фиксирующей скобы 7, охватывающих их прямолинейные участки. Передняя часть скобы 7а охватывает цифровой накопитель 6, а задняя часть скобы 7б охватывает ЗЧЯ 5. Части скобы фиксируются между собой при помощи разъемных фиксаторов 8.

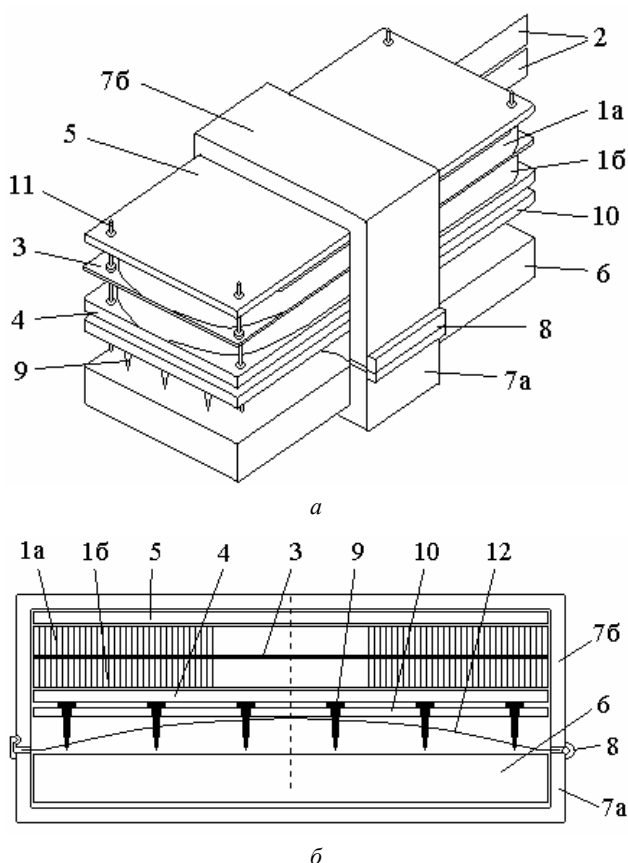


Рис. 7. Общий вид (а) и поперечное сечение (б) ЛИЭП для уничтожения информации на SSD накопителе

Ударный исполнительный элемент содержит упорядочено расположенные заостренные бойки 9 в форме закаленных гвоздей. Шляпка каждого бойка расположена между ПЧЯ 4 и ударной пластиной 10, а стержни бойков выполнены в форме заостренного

конуса и зафиксированы в отверстиях ударной пластины 10. ПЧЯ 4 и ударная пластина 10 соединены между собой. ПЧЯ 4, ЗЧЯ 5, индукторная 3 и ударная 10 пластины выполнены в форме прямоугольников, что соответствует форме цифрового SSD накопителя информации 6.

В угловых участках индукторной пластины 3 перпендикулярно закреплены направляющие стойки 11, которые проходят через направляющие отверстия ПЧЯ ЗЧЯ и ударной пластины 10.

Направляющие стойки присоединены к индукторной пластине 3. Устройство содержит плоскую пружину 12, средняя часть которой взаимодействует с ударной пластиной 10, а ее концы закреплены относительно задней и передней частей скобы в разъемных фиксаторах 8. В исходном состоянии пружины 12 своей средней частью прижимает ударную пластину 10 вместе с ПЧЯ 4 к обмотке индуктора 1б, а обмотку 1а – к ЗЧЯ 5.

При необходимости уничтожения информации, размещенной на твердотельном цифровом SSD накопителе, например, при поступлении сигнала о несанкционированном доступе к его информации происходит разряд емкостного накопителя энергии на индуктор. При этом происходит перемещение ударной пластины 10 с бойками 9, которые проникают в массив цифрового накопителя 6, безвозвратно уничтожая находящуюся на нем информацию.

Кроме того, ПЧЯ и ЗЧЯ экранируют магнитное поле, возбуждаемое индуктором, что благоприятно для близко расположенных электронных и биологических объектов [14].

На основании проведенных исследований был разработан экспериментальный образец ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем.

Для проведения экспериментальных исследований ЛИЭП использовался диодно-тиристорный блок, электронный блок формирования импульса с конденсаторами, аккумулятор и пусковое устройство (рис. 8,а). При экспериментальных исследованиях в качестве объекта воздействия использовалась многослойная конструкция, набранная из тонких стальных листов, подпертых листами ДСП и стеклотекстолита. Такая конструкция позволяла визуально оценить глубину проникновения бойков в объект воздействия. Как показали эксперименты, после срабатывания ЛИЭП боек эффективно пробивал практически весь объект воздействия.

На рис. 9 показаны опытный образец ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем, предназначенный для уничтожения информации на SSD накопителе и результаты его воздействия на многослойный образец.

В опытном образце индуктор был покрыт декоративной черной пленкой и были усовершенствованы фиксирующие скобы, которые выполняли функцию наружного корпуса и полностью охватывали объект воздействия и ЗЧЯ.

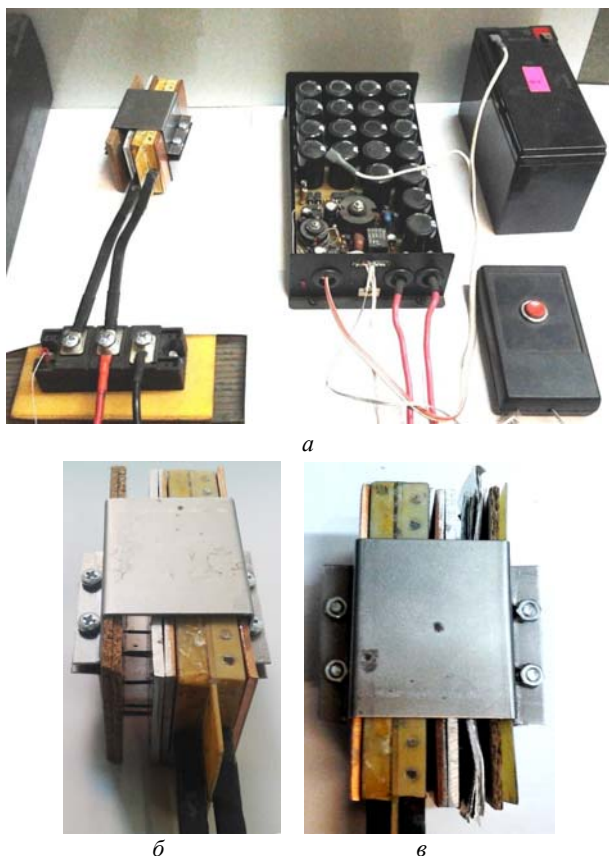


Рис. 8. Оборудование для испытания ЛИЭП (а), экспериментальный образец ЛИЭП в исходном положении (б) и после срабатывания (в)

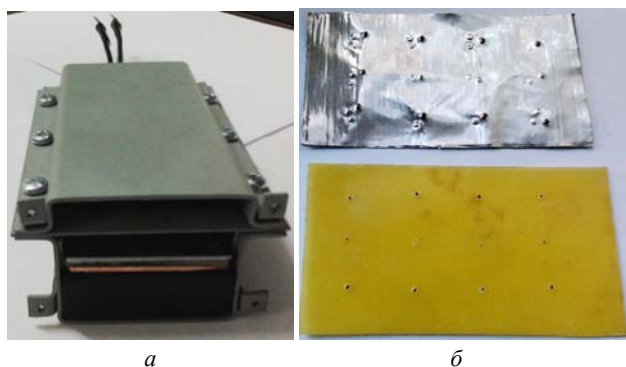


Рис. 9. Опытный образец ЛИЭП для уничтожения информации на SSD накопителе (а) и результаты его воздействия на многослойный образец (б)

Выводы.

1. При помощи математической модели, учитывающей взаимосвязанные электрические, магнитные, тепловые и механические процессы установлено влияние геометрических параметров на электродинамические характеристики и показатели ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем, охватывающим индуктор с противоположных сторон.

2. Определены пути повышения силовых показателей ЛИЭП – максимальной величины и импульса электродинамических усилий между частями двойного якоря. Впервые установлено, что силовые показатели ЛИЭП увеличиваются при максимальном приближении обеих частей двойного якоря к индуктору, при увеличении числа витков и неизменных габари-

тах индуктора, при уменьшении ширины медной шины и ширины индуктора.

3. Разработан и экспериментально испытан образец ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем, предназначенный для уничтожения информации, размещенной на твердотельном цифровом SSD накопителе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томашевский Д.Н., Кошкин А.Н. Моделирование линейных электродвигателей импульсного действия // Электротехника. – 2006. – №1. – С. 24-27.
2. Ивашин В.В., Пенчев В.П. Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. – 2013. – №6. – С. 42-46.
3. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. – 2011. – vol.82. – no.2. – pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.
4. Болух В.Ф., Шукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
5. Иванов В.В., Паранин С.Н., Ноздрин А.А. Полуавтоматическая установка магнитно-импульсного прессования порошков // Материаловедение. – 2011. – № 7. – С. 42-45.
6. Young-woo Jeong, Seok-won Lee, Young-geun Kim, Hyun-wook Lee. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013). – 2013, 10-13 June, Stockholm. – Paper 608. doi: 10.1049/cp.2013.0834.
7. Болух В.Ф., Шукин И.С. Высокоэффективные импульсные электромеханические и электромагнитные устройства уничтожения информации на цифровых накопителях // Электротехніка і електромеханіка. – 2015. – №5. – С. 36-46. doi: 10.20998/2074-272x.2015.5.05.
8. Пат. РФ № 2654163, МПК G11C 13/00, G06F 21/60. Устройство уничтожения информации, размещенной на твердотельном цифровом SSD накопителе / Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Шукин И.С. – Заявка № 2017109042. Заявл. 17.03.2017. Оpubл. 16.05.2018, Бюл. № 14.
9. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – vol.48. – no.11. – pp. 3315-3318. doi: 10.1109/tmag.2012.2198447.
10. US Patent 8686814: H01H77/00. Electric switching device with ultra-fast actuating mechanism and hybrid switch comprising one such device / Schneider Electric Industries SAS. 01.04.2014.
11. Болух В.Ф., Данько В.Г., Олексенко С.В. Влияние наружного экрана на эффективность линейного импульсного электромеханического преобразователя индукционного типа // Электротехника. – 2018. – №4. – С. 63-69. doi: 10.3103/s106837121804003x.
12. Болух В.Ф., Кочерга А.И., Шукин И.С. Электромеханические процессы в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе с подвижным индуктором и двумя якорями // Электротехніка і електромеханіка. – 2018. – №2. – С. 11-17. doi: 10.20998/2074-272X.2018.2.02.
13. Болух В.Ф., Кочерга А.И., Шукин И.С. Исследование линейного импульсно-индукционного электромеханического преобразователя при различных схемах питания индуктора // Электротехніка і електромеханіка. – 2018. – №1. – С. 21-28. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.03.
14. Болух В.Ф., Кочерга О.І., Шукин І.С. Порівняльний аналіз конструктивних типів комбінованих лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів // Технічна електродинаміка. – 2018. – №4. – С. 84-88.

REFERENCES

1. Tomashevsky D.N., Koshkin A.N. Modeling of linear impulse electric motors. *Russian Electrical Engineering*, 2006, no.1, pp. 24-27. (Rus).
2. Ivashin V.V., Penchev V.P. Features of the dynamics of work and energy diagrams of pulsed electromagnetic drive with parallel and series connection of excitation windings. *Electrical engineering*, 2013, no.6, pp. 42-46. (Rus).
3. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. *Russian electrical engineering*, 2011, vol.82, no.2, pp. 104-110. doi: **10.3103/s1068371211020027**.
4. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induktsionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
5. Ivanov V.V., Pararin S.N., Nozdrin A.A. Semiautomatic installation of magnetic pulse compaction of powders. *Materialovedenie*, 2011, no.7, pp. 42-45. (Rus).
6. Young-woo Jeong, Seok-won Lee, Young-geun Kim, Hyun-wook Lee. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, 10-13 June, Stockholm, Paper 608. doi: **10.1049/cp.2013.0834**.
7. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. High-performance electromechanical and electromagnetic pulse devices for destruction of information on digital drives. *Electrical engineering and electromechanics*, 2015, no.5, pp. 36-46. (Rus). doi: **10.20998/2074-272x.2015.5.05**.
8. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Ustroistvo unichtozheniia informatsii, razmeshchennoi na tverdotel'nom tsifrovom SSD nakopitele* [A device for destroying information located on a solid state digital SSD drive]. Patent Russian Federation, no. 2654163, 2018. (Rus).
9. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, vol.48, no.11, pp. 3315-3318. doi: **10.1109/tmag.2012.2198447**.
10. Schneider Electric Industries SAS. *Electric switching device with ultra-fast actuating mechanism and hybrid switch comprising one such device*. Patent USA, no.8686814, 2014.
11. Bolyukh V.F., Dan'ko V.G., Oleksenko S.V. The Effect of an External Shield on the Efficiency of an Induction-Type Linear-Pulse Electromechanical Converter. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol.89, no.4, pp. 275-281. doi: **10.3103/s106837121804003x**.
12. Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Schukin I.S. Investigation of a linear pulse-induction electromechanical converter with different inductor power supply circuits. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.2, pp. 11-17. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2018.2.02**.
13. Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Schukin I.S. Investigation of a linear pulse-induction electromechanical converter with different inductor power supply circuits. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp. 21-28. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2018.1.03**.
14. Bolyukh V.F., Kocherga A.A., Shchukin I.S. Comparative analysis of constructive types of combined linear pulse electromechanical converters. *Technical electrodynamics*, 2018, no.4, pp. 84-88. (Ukr). doi: **10.15407/techned2018.04.084**.

Поступила (received) 22.06.2018

Болух Владимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
 Каианский Юрий Владимирович¹, магистрант,
 Кочерга Александр Иванович¹, аспирант,
 Щукін Ігорь Сергеевич^{1,2}, к.т.н., доц.,
¹Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +38 057 7076427, e-mail: vfbolyukh@gmail.com
²ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, Yu.A. Kashanskij¹, A.I. Kocherga¹, I.S. Schukin^{1,2}
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kurychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
²Firm Tetra, LTD,
 2, Kurychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Investigation of linear pulse electromechanical converter of induction type with double armature intended for destroying information on SSD storage device.

Purpose. The goal of the paper is to determine the influence of the linear pulse electromechanical converter (LPEC) parameters with a double armature on its electrical, power and temperature indices and experimental verification of the proposed design for an information destruction device in a flat SSD storage device.

Methodology. Using the mathematical model that takes into account interrelated electrical, magnetic, thermal and mechanical processes, the influence of geometric parameters on the electrodynamic characteristics and the indices of the induction type LPEC with a double armature spanning the inductor from opposite sides is investigated. **Results.** It is shown that the currents in the inductor and armature change in accordance with the oscillation-damping law practically in antiphase. The maximum value of the current density in the inductor is 215.8 A/mm², and in each of the identical parts of the double armature it is 299.7 A/mm². The maximum value of electrodynamic forces (EDF) acting in opposite directions on the front and rear of the double armature is 11.99 kN, and the value of the EDF pulse is 4.59 N·s. **Originality.** It is established that with axial removal of the rear part of the armature from the inductor, the maximum current densities in the inductor decrease, in the front part of the armature increase, and in the rear part of the armature decrease. The maximum value and the pulse of the EDF between the armature parts decrease. With an increase in the number of turns in the inductor and a decrease in the thickness of the copper bus, all the basic indicators of the LPEC increase. With an increase in the number of turns of the inductor from 26 to 56, the maximum EDF value acting between the parts of the armature increases almost 3 times, and the magnitude of the EDF pulse is 3.3 times. With an increase in the width of the copper bus and the width of the inductor, the main indicators of the LPEC decrease. With an increase in the width of the inductor from 10 mm to 20 mm, the maximum EDF between the armature parts decreases by 1.3 times, and the value of the EDF pulse decreases by 1.2 times. **Practical value.** Based on the conducted studies, an induction-type LPEC model with a double armature was designed and tested experimentally, designed to destroy information located on a solid-state digital SSD storage device. References 14, figures 9.

Key words: linear pulse electromechanical converter of induction type, double armature, electrodynamic processes, digital SSD storage device, experimental sample.

Ю.М. Васьковський, М.В. Пода, І.В. Кошикар

ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР В СИСТЕМІ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У статті розглядається система рекуперації енергії механічних коливань транспортних засобів в корисну електроенергію, яка накопичується в акумуляторній батареї. Одним з основних елементів такої системи є електрогенератор, який перетворює механічну енергію коливань шасі транспортного засобу в електричну енергію. Також розглянута проблема вибору та оптимізації конструкції і параметрів генератора. З огляду на особливості функціонування транспортного засобу найбільш доцільним типом генератора в такій системі є синхронний генератор з постійними магнітами, який має суттєві конструктивні відмінності від традиційних синхронних машин з постійними магнітами. Критерієм оптимізації генератора є максимальна величина діючого значення ЕРС, яка індукується в обмотці статора. За результатами моделювання на основі польової математичної моделі отримано сукупність значень узагальнених коефіцієнтів, які характеризують оптимальну геометрію генератора. Бібл. 4, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: система рекуперації електроенергії, синхронний генератор, постійні магніти, математична модель.

В статье рассматривается система рекуперации энергии механических колебаний транспортных средств в электроэнергию, которая накапливается в аккумуляторной батарее. Одним из основных элементов такой системы является электрогенератор, который преобразует механическую энергию колебаний шасси транспортного средства в электрическую энергию. Также рассмотрена проблема выбора и оптимизации конструкции и параметров генератора. Учитывая особенности функционирования транспортного средства наиболее целесообразным типом генератора в такой системе является синхронный генератор с постоянными магнитами, который имеет существенные конструктивные отличия от традиционных синхронных машин с постоянными магнитами. Критерием оптимизации генератора является наибольшая величина действующего значения ЭДС, индуцированной в обмотке статора. По результатам моделирования на основе полевой математической модели получена совокупность значений обобщенных коэффициентов, характеризующих оптимальную геометрию генератора. Библ. 4, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: система рекуперации электроэнергии, синхронный генератор, постоянные магниты, математическая модель.

Вступ. Вимоги щодо розширення функціональних можливостей сучасних транспортних засобів (ТЗ) загального і спеціального призначення обумовлюють використання на борту ТЗ нових пристроїв і систем, для роботи яких потрібні додаткові потужності джерел електроживлення. Оскільки уся енергія, яку отримує ТЗ для свого функціонування, надходить від використання запасів первинного енергоносія (зазвичай це паливо двигуна внутрішнього згорання), то додаткові джерела електроживлення можна отримати лише на основі принципів енергозбереження – шляхом виявлення зайвих втрат енергії в ТЗ і розробки систем перетворення частини цих втрат в корисні запаси електроенергії акумуляторної батареї (АБ). Однією з таких є система електромеханічного перетворення енергії механічних коливань (СПЕМК) шасі ТЗ, які виникають під час руху ТЗ. Розробка та дослідження таких систем вже проводиться рядом закордонних компаній – Bose, Levant Power Corp, Audi [1-3]. Наприклад, потужність системи eROT для легкового автомобіля фірми Audi складає до 613 Вт на поганому покритті, а на звичайних трасах – 100-150 Вт. В Україні зазначені розробки тільки починаються, причому їх використання може бути найбільш доцільним та ефективним для великовантажних ТЗ.

Метою статті є отримання за результатами математичного моделювання оптимальних параметрів синхронного генератора, що входить до складу системи електромеханічного перетворення енергії механічних коливань шасі транспортного засобу.

Загальний аналіз. При рівномірному русі ТЗ по ідеально рівній поверхні (дорозі) існує рівновага сил

тяжіння підресореної маси (ПрМ) ТЗ і реакції пружного елемента підвіски. При цьому ПрМ не робить вертикальних коливань, а енергія двигуна витрачається тільки на подолання сили тертя коліс об поверхню. При наявності на дорозі сходинки униз глибиною h , колеса ТЗ швидко опускаються вниз, і під дією виниклого дисбалансу сил ПрМ опускається вниз, зменшуючи свою потенційну енергію на величину

$$\Delta W = mgh, \quad (1)$$

де m – маса ПрМ, g – прискорення вільного падіння.

Після виникнення згасаючих коливань, в результаті яких зазначена енергія розсіюється в амортизаторах підвіски, режим рівномірного руху ТЗ відновлюється. При наявності на дорозі сходинки уверх потенційна енергія ПрМ збільшується за рахунок енергії приводного двигуна. В процесі коливань відбувається взаємне переміщення непідресореної (НПрМ) і підресореної мас ТЗ у вертикальній площині, яке дозволяє створити системи електромеханічного перетворення енергії механічних коливань в корисну електроенергію. При наявності на дорозі ряду сходинок (нерівностей, ям) зазначений процес циклічно повторюється. В реальних умовах повторюваність ям на дорозі і їх глибина носять випадковий характер. Однак для оцінки додаткових витрат енергії, викликаних вертикальними коливаннями ТЗ при русі по нерівній дорозі, можна вести еквівалентну частоту повторюваності процесу коливань f в умовах однакової глибини ям h . Частота власних коливань ПрМ ТЗ зазвичай налаштовується на величину 1...2 Гц, і вони завдяки потужним амортизаторам загасають за декілька коливань.

Розглянемо приклади важких ТЗ: 1) вантажний автомобіль КрАЗ-253Б, його споряджена маса (СМ) становить 11,5 т; 2) бронетранспортер БТР-4 Буцефал – СМ дорівнює 21,9 т. Припускаючи, що співвідношення НПрМ і ПрМ дорівнює 1:15, що характерно для будь-яких ТЗ, величини ПрМ дорівнюють відповідно 10,7 і 20,4 тонн. За одне коливання такої маси на глибину $h = 0,05$ м зміна потенційної енергії ПрМ складе відповідно $\Delta W = 5,24$ і 10 кДж. Якщо при русі ТЗ по пересіченій місцевості такі коливання постійно повторюються, наприклад, з частотою $f = 0,2$ Гц (період коливання 5 с), то потужність, що втрачається в амортизаторах ТЗ дорівнює:

$$\Delta P = \Delta W \cdot f \quad (2)$$

або відповідно $\Delta P = 1,05$ і 2 кВт. Отримана оцінка свідчить про значні втрати потужності двигуна ТЗ в амортизаторах, що робить доцільним її перетворення в електричну енергію, накопичення її в АБ і подальше використання в споживчих системах ТЗ.

Для інтегральної оцінки потужності механічних коливань з урахуванням різних факторів, що впливають на її величину, можна ввести коефіцієнт потужності механічних коливань

$$k_e = mh f, \text{ (т}\cdot\text{м/с)}. \quad (3)$$

Так, для наведених прикладів при $\Delta P = 1,05$ кВт маємо $k_e = 0,107$, а при $\Delta P = 2$ кВт коефіцієнт дорівнює $k_e = 0,204$. Очевидно, що такі ж величини ΔP можна отримати при інших значеннях маси, глибини ступені і частоти повторення коливань. Наприклад, $\Delta P = 1,05$ кВт можна отримати при $m = 5,36$ т, $h = 0,05$ м і $f = 0,4$ Гц або при $m = 8$ т, $h = 0,06$ м і $f = 0,223$ Гц. З урахуванням виразів (1) і (2) маємо просту універсальну формулу для оцінки величини потужності, що втрачається при русі ТЗ по нерівній дорозі:

$$\Delta P = g k_e. \quad (4)$$

Взаємне переміщення ПрМ і НПрМ при русі ТЗ в складних дорожніх умовах надає принципові можливості для створення СПЕМК ТЗ.

Структурна блок-схема СПЕМК представлена на рис. 1.

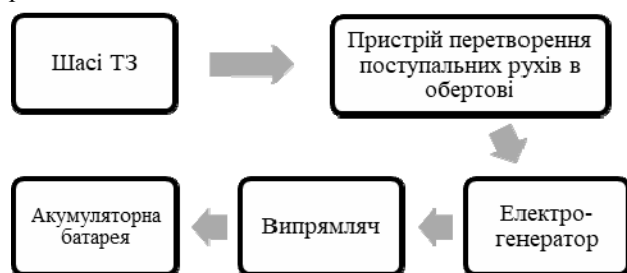


Рис. 1 Структурна блок-схема СПЕМК

Робота СПЕМК відбувається наступним чином. Взаємні зворотно-поступальні переміщення ПрМ і НПрМ через механічний перетворювальний пристрій перетворюються в односпрямований обертальний рух ротора електрогенератора, в якому здійснюється перетворення механічної енергії в електричну енергію. Змінна напруга на виході генератора випрямляється у випрямлячі і заряджає АБ. Таким чином, в СПЕМК відбувається перетворення параметрів енергії в наступній послідовності: «механічна енергія зворотно-

поступального руху – механічна енергія обертового руху – електрична енергія змінного струму електрогенератора – електроенергія постійного струму АБ».

Електрогенератор створює гальмуючий електромагнітний момент, який протидіє вимушеним коливанням шасі ТЗ. Таким чином, СПЕМК здійснює дві корисні функції: а) перетворює частину енергії механічних коливань ТЗ в корисну електричну енергію АБ; б) сприяє гасінню коливань шасі, тобто частково виконує функції амортизатора. Слід зазначити, що друга функція в важких ТЗ не є основною, оскільки СПЕМК в важких ТЗ не може замінити традиційні амортизатори, а може лише в незначній мірі доповнювати їх. Таким чином, головною функцією СПЕМК є створення на борту ТЗ додаткового джерела електроживлення.

Моделювання та дослідження електрогенератора СПЕМК. Важливим елементом, який в значній мірі визначає ефективність рекуперації енергії в СПЕМК, є електрогенератор. Аналіз показує, що з урахуванням особливостей функціонування СПЕМК, оптимальним типом генератора є трифазний синхронний генератор змінного струму з постійними магнітами на роторі (СПІМ).

Застосування постійних магнітів (ПМ) як джерел магнітного потоку збудження є оптимальним технічним рішенням. При цьому у генератора немає тривалого сталого режиму роботи – він завжди працює в перехідних режимах зі змінною швидкістю обертання валу. Механічний момент, що приводить генератор в обертання, має випадковий імпульсний характер, обумовлений дорожніми умовами руху ТЗ. Головними питаннями проектування електрогенератора є: а) оптимізація конструкції генератора за обраним критерієм з урахуванням імовірнісних змінних характеристик руху ТЗ; б) оцінка можливої частки енергії механічних коливань ТЗ, яка може бути перетворена в електричну енергію з урахуванням допустимих габаритних характеристик СПЕМК.

Враховуючи реальні умови функціонування СПІМ в складі СПЕМК його конструкція і параметри мають ряд суттєвих відмінностей від СПІМ традиційного виконання. А саме:

1. Аналіз доцільної конструктивної компоновки СПІМ на шасі ТЗ показує, що загальна конфігурація генератора повинна бути «довгою» – відношення довжини осердя статора до його зовнішнього діаметра лежить в діапазоні значень $l_s / D_j = 2,5 \dots 3,5$.

2. Середня швидкість обертання ротора, яку може отримати генератор в складі СПЕМК, є відносно невеликою: $n_2 = 200 \dots 400$ об/хв. Тому для отримання прийнятної величини ЕРС обмотки статора СПІМ, яка пропорційна швидкості зміни у часі магнітного потокозчеплення (частоті), генератор повинен мати достатню велику кількість полюсів – кількість пар полюсів дорівнює $p = 4 \dots 5$.

3. З урахуванням можливостей розміщення багатополосної трифазної обмотки статора в осерді малого діаметра кількість котушок на полюс і фазу обмотки статора дорівнює $q = 1$, а кількість пазів осердя статора дорівнює $Z_1 = 24 \dots 30$. З урахуванням цих даних проектування статора виконується по загальним методикам проектування електричних машин змінного струму.

4. З метою забезпечення високого рівня надійності СГПМ доцільно використовувати ротор з ПМ, які мають радіальний напрямок вектора намагнічування і закріплюються на поверхні феромагнітного ярма ротора. На рис. 2, як приклад, показано поперечний переріз активної зони варіанту СГПМ.

5. Важливе значення має правильний вибір параметрів ПМ. При цьому необхідно обґрунтувати критерії, за якими цей вибір повинен виконуватися. На відміну від традиційних СГПМ для генератора, що функціонує в складі СПЕМК, не висувається вимога щодо синусоїдного розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку уздовж полюсної поділки. ЕРС і струми статора не обов'язково мають змінюватися у часі за синусоїдним законом, оскільки навантаженням СГПМ в складі СПЕМК є випрямляч і надалі АБ (рис. 1). Критерієм вибору параметрів ПМ є *максимальна величина діючого значення ЕРС обмотки статора при виконанні інших рівних умов.*

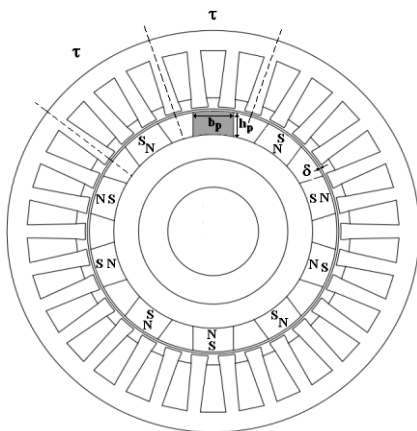


Рис. 2. Поперечний переріз активної зони СГПМ

Узагальненими геометричними параметрами, які характеризують ПМ в конструкції СГПМ, є:

- коефіцієнт форми магніту – відношення ширини магніту до його висоти $k_p = b_p / h_p$. Зазвичай, з огляду на вимоги щодо простоти та технологічності виконання ротора, ПМ виконують у вигляді призми з прямокутною формою поперечного перерізу;
- коефіцієнт полюсного перекриття – відношення ширини магніту ротора до полюсної поділки ротора $\alpha = b_p / \tau$;
- коефіцієнт висоти магніту, який характеризує відношення висоти ПМ до радіусу ротора $k_R = h_p / R_2$;
- коефіцієнт відносної величини повітряного проміжку – відношення висоти повітряного проміжку між статором і ротором до полюсної поділки ротора $k_\delta = \delta / \tau$.

Варіювання зазначених коефіцієнтів при оптимізації параметрів магніту повинно відбуватися за умови незмінності в кожному варіанті площі перерізу (об'єму) ПМ $S_p = b_p \cdot h_p = \text{const}$, оскільки збільшення об'єму ПМ, а значить і його магнітного потоку, само по собі збільшує ЕРС статора і тому не дозволяє визначити оптимальну геометрію СГПМ.

Зазначені коефіцієнти характеризують не тільки геометрію самого ПМ, але й його співвідношення з геометрією інших елементів активної зони СГПМ. Таким чином задача оптимізації зводиться до знахо-

дження екстремуму функції мети – *максимуму діючого значення ЕРС обмотки статора* при варіюванні зазначених коефіцієнтів з урахуванням обмежень на їх величини, які витікають з можливостей конструктивного виконання генератора. Така оптимізація виконується шляхом математичного моделювання.

Математична модель СГПМ. Розглядається польова математична модель СГПМ з рухомих ротором, яка дозволяє проаналізувати у часі електромагнітні процеси, що виникають при обертанні ротора [4]. Рівняння для функцій часу записуються так:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}, \quad (5)$$

$$E_j(t) = \frac{2nal\delta}{S_p} \int_{S_i} E_n(t) ds, \quad (6)$$

де: \mathbf{A} – векторний магнітний потенціал; \mathbf{B}_r – вектор залишкової магнітної індукції ПМ; μ, γ – магнітна проникність і електропровідність матеріалу (задаються для кожної з підобластей розрахункової області згідно з їх характеристиками – ПМ, повітряний проміжок, феромагнітна сталь, тощо); \mathbf{v} – вектор швидкості руху ділянок ротора відносно системи координат статора; $J = I_p n a / S_p$ – густина струму в обмотці статора, яка визначається за заданими значеннями струму, числом послідовно з'єднаних провідників в пазу статора n та частиною площі перетину паза статора S_p , яка приходить на одну паралельну гілку.

Вектор \mathbf{B}_r повинен відображати обраний напрям намагнічування ПМ. Вектор швидкості визначається через задану кутову швидкість ротора ω_R і радіус-вектор поточної точки ротора $\mathbf{v} = \omega_R \mathbf{r}$.

Рівняння (5) доповнюється відповідними граничними умовами. Зазвичай це однорідні граничні умови першого роду на зовнішній границі розрахункової області – ярмі осердя статора.

Миттєве значення ЕРС фази статора як функції часу визначається формулою (6), де інтегрування проводиться по сумарній площі поперечного перерізу провідників фази. Інтегрується нормальна складова вектора напруженості електричного поля $E_n(t)$ – складова вектора напруженості, яка направлена перпендикулярно до площі перерізу провідників обмотки. Напруженість електричного поля при умові, що скалярний електричний потенціал $\varphi = 0$, обчислюється, як $\mathbf{E}(t) = -\partial \mathbf{A} / \partial t$. Діюче значення ЕРС знаходиться на періоді T зміни функції $E_j(t)$

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E_j^2(t) dt}. \quad (7)$$

При обертанні ротора відбувається зміна конфігурації розрахункової області за рахунок зміни взаємного положення статора і елементів конструкції ротора, тобто координат усіх точок ротора. При обертанні ротора проти годинникової стрілки з постійною швидкістю приріст координат точок ротора $\Delta x, \Delta y$ за один крок по часу Δt визначається:

$$\begin{cases} \Delta x = \cos[\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot X - \sin[\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot Y - X \\ \Delta y = \sin[\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot X + \cos[\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot Y - Y \end{cases}, \quad (8)$$

де X, Y – поточні координати точок ротора.

Результати моделювання та оптимізації СГПМ. Розглянуто СГПМ, який має наступні дані: число фаз статора $m = 3$; число пар полюсів $p = 5$; активна довжина $l_\delta = 0,26$ м; зовнішній діаметр ярма статора $D = 0,1$ м; внутрішній діаметр ярма ротора, $D_0 = 0,022$ м; номінальна потужність $P_n = 400$ Вт; номінальна (діюча) фазна напруга обмотки статора $U_1 = 16$ В; номінальна частота обертання ротора $n_{\text{ном}} = 200$ об/хв. Постійний магніт має наступні характеристики: $B_r = 1,18$ Тл, $\mu_r = 1,065$.

На рис. 3 представлено часові залежності ЕРС статора для різних значень коефіцієнта полюсного перекриття: 1 – при $\alpha = 0,69$; 2 – $\alpha = 0,58$; 3 – $\alpha = 0,49$; 4 – $\alpha = 0,36$. З наведених залежностей видно, що зростання α призводить до збільшення ширини кривих, а значить до збільшення діючого значення ЕРС при практично незмінній її амплітуді. Тобто ширина ПМ суттєво впливає на величину E .

Розрахунки виконано в режимі холостого ходу генератора. На рис. 4, 5 представлено залежності амплітуди (пунктирна лінія) і діючого значення (суцільна лінія) ЕРС обмотки статора від відповідно коефіцієнту полюсного перекриття α і коефіцієнту форми магніту k_p при умові незмінності об'єму ПМ.

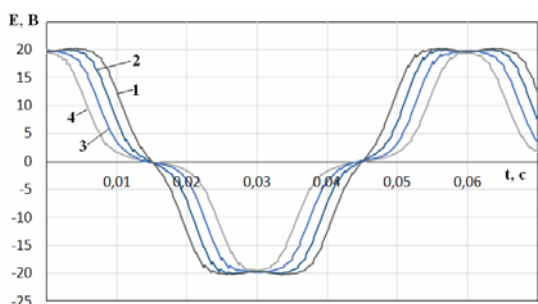


Рис. 3. Часові залежності ЕРС

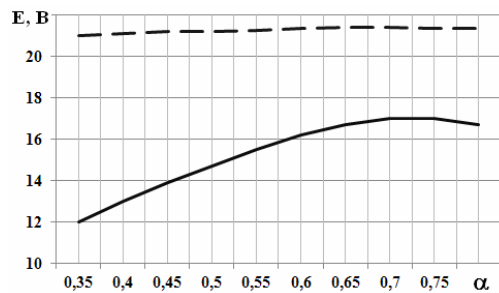


Рис. 4. Залежності ЕРС від коефіцієнту α

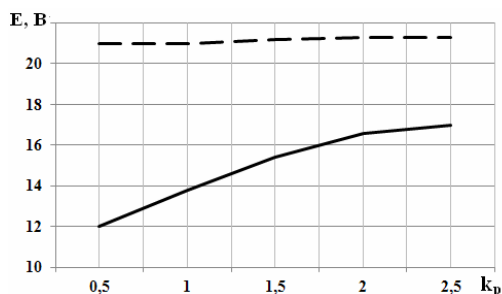


Рис. 5. Залежності ЕРС від коефіцієнту k_p

Наведені залежності свідчать, що при практично незмінній амплітуді ЕРС використання більш широких і не високих ПМ веде до зростання діючого значення ЕРС.

Надмірне зростання ширини ПМ є недоцільним, оскільки воно обмежується збільшенням магнітних потоків розсіювання між ПМ, які розташовані поруч, а також конструктивними чинниками. Оптимальні значення коефіцієнтів: $k_p = 2,5 \dots 3$ і $\alpha = 0,75 \dots 0,8$.

Зазначений висновок підтверджують розрахункові залежності ЕРС від коефіцієнту висоти магніту $k_R = h_p / R_2$, зображені на рис. 6. Розрахунки виконані при незмінній ширині магніту $b_p = 6$ мм і варіюванні висоти магніту від 3 до 8 мм. При варіаціях об'єму магнітів збільшується в 2,67 разів. Наведені дані свідчать, що при $k_R > 0,2$ зростання ЕРС майже не відбувається, тобто виконання занадто високих магнітів є недоцільним.

Це обумовлено тим, що частина ПМ, розташована біля ярма ротора, практично «не приймає участі» у створенні магнітного потоку взаємодії ротора з обмоткою статора, а створює лише потоки розсіювання ПМ. Тому значення коефіцієнту висоти магніту лежать в діапазоні значень $k_R = 0,1 \dots 0,13$.

Величина повітряного проміжку між статором і ротором впливає на ЕРС обмотки статора. На рис. 7 зображено часові залежності ЕРС обмотки статора для величин: $\delta = 0,5$ мм (позначено цифрою 1); $0,75$ мм (цифра 2) і 1 мм (цифра 3), яким відповідають значення коефіцієнту відносної величини повітряного проміжку $k_\delta = \delta / \tau = 0,053$; $0,04$ і $0,0265$.

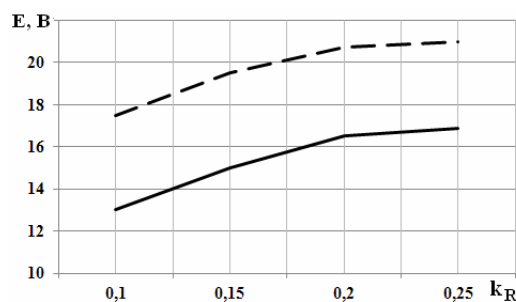


Рис. 6. Залежності ЕРС від коефіцієнту k_R

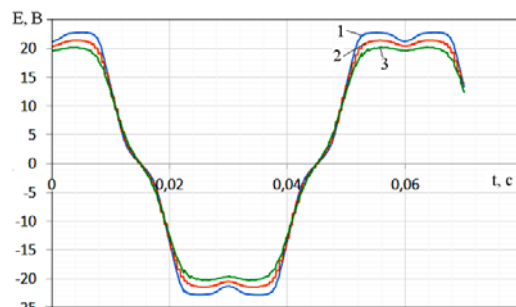


Рис. 7. Часові залежності ЕРС від коефіцієнту k_δ

Розрахунки проведені при фіксованому значенні ширини ПМ. З наведених даних видно, що навіть при двократному збільшенні δ в межах, які можуть бути обумовлені конструктивними чинниками, величина ЕРС зменшується лише на 13,7%.

Аналогічні числові дослідження проводилися і для інших типорозмірів СГПМ, в результаті чого було встановлено наступні представлені в таблиці оптимальні значення узагальнених геометричних коефіцієнтів, які доцільно використовувати при проектуванні СГПМ, що призначені для роботи в складі СПЕМК.

Величина ЕРС СГПМ, а значить і ефективність роботи СПЕМК в значній мірі залежить від швидкості обертання ротора генератора, яка визначається дорожніми умовами руху ТЗ. Тому енергоємність і параметри АБ, час її заряду, тощо потребують спеціального узгодження з параметрами СГПМ з урахуванням імовірних характеристик руху конкретного типу ТЗ.

Таблиця
Оптимальні геометричні коефіцієнти СГПМ

Найменування коефіцієнту	Числове значення
Відношення довжини осердя статора до його зовнішнього діаметру l_δ / D_j	2,6...3
Коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha = b_p / \tau$	0,68...0,75
Коефіцієнт форми магніту $k_p = b_p / h_p$	2,1...2,5
Коефіцієнт висоти магніту $k_R = h_p / R_2$	0,1...0,16
Коефіцієнт відносної величини повітряного проміжку $k_\delta = \delta / \tau$	0,04...0,05

Висновки.

1. Додатковим джерелом електроживлення на борту транспортного засобу може бути система електро-механічної рекуперації енергії механічних коливань шасі ТЗ під час його руху в електричну енергію АБ. Аналіз підтверджує наявність достатньої величини енергії, яка зазвичай втрачається амортизаторах ТЗ і яка може бути частково накопичена в АБ.

2. Досліджено параметри важливого елементу зазначеної системи – синхронного генератора з постійними магнітами, який з огляду на особливості його функціонування має суттєві відмінності від аналогічних генераторів традиційного виконання. Визначено оптимальні діапазони параметрів СГПМ. Їх чисельні значення представлені в таблиці і можуть використовуватися при розробці СГПМ в зазначених системах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Drive2 – Автомобильный журнал. Электромагнитная подвеска Bose. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.drive2.ru/b/721443/>.
2. Drive2 – Автомобильный журнал. GenShock — система подвески, выполняющая функцию регенерации энергии. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.drive2.com/b/668040/>.
3. Audi MediaCenter. The innovative shock absorber system from Audi. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.audi-mediacyber.com/en/press-releases/the-innovative-shock-absorber-system-from-audi-new-technology-saves-fuel-and-enhances-comfort-6551>.
4. Васьковський Ю.М., Гайдено Ю.А. Дослідження електромагнітних процесів в синхронних машинах з постійними магнітами на основі коло-польових математичних моделей // Технічна електродинаміка. – 2018. – №2. – С. 47-54. doi: 10.15407/techne2018.02.047.

REFERENCES

1. Drive2 – Automobile Journal. *Electromagnetic suspension Bose*. Available at: <https://www.drive2.ru/b/721443/> (accessed 13 September 2016). (Rus).
2. Drive2 – Automobile Journal. *GenShock — suspension system performing the function of energy regeneration*. Available at: <https://www.drive2.com/b/668040/> (accessed 11 May 2016). (Rus).
3. Audi MediaCenter. *The innovative shock absorber system from Audi*. Available at: <https://www.audi-mediacyber.com/en/press-releases/the-innovative-shock-absorber-system-from-audi-new-technology-saves-fuel-and-enhances-comfort-6551> (accessed 20 June 2017).
4. Vaskovskyi Yu.M., Haydenko Yu.A. Research of electromagnetic processes in permanent magnet synchronous motors based on a «electric circuit – magnetic field» mathematical model. *Technical Electrodynamics*, 2018, no.2, pp. 47-54. (Ukr). doi: 10.15407/techne2018.02.047.

Надійшла (received) 15.06.2018

Васьковський Юрій Миколайович¹, д.т.н., проф.,
Пода Михайло Валерійович¹, аспірант,
Кошикар І.В.¹, магістр,

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
03056, Київ, пр. Перемоги, 37,
e-mail: vun157@gmail.com, poda.mv@gmail.com

Yu.M. Vaskovskyi¹, M.V. Poda¹, I.V. Koshikar¹
¹ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

Electric generator in the recuperation system of the energy from mechanical oscillations in vehicles.

The paper deals with the system of mechanical energy recuperation of vehicles in the useful electric energy accumulated in the rechargeable battery. This system creates an additional power supply on board of the vehicle and, based on the principle of energy conservation, increases the efficiency of the use of the fuel of the primary engine. One of the main elements of such system is an electric generator, which transforms the mechanical energy of the oscillations of the vehicle's chassis into electric energy. The problem of choosing and optimizing the design and parameters of the generator is considered in the paper. Given the peculiarities of the functioning of the vehicle, the most appropriate type of generator in such system is a synchronous generator with permanent magnet, which has significant structural differences from conventional synchronous machines with permanent magnets. The criterion for optimizing the generator is the largest value of the effective value of the EMF, which is induced in the stator winding. On the basis of simulation results, based on the field mathematical model, a set of values of generalized coefficients that characterize the optimal generator geometry is obtained. References 4, table 1, figures 7.

Key words: electric energy recuperation system, synchronous generator, permanent magnets, mathematical model.

В.В. Шевченко, А.Н. Минко, А.В. Строкоус

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ СИЛ В ЭЛЕМЕНТАХ КРЕПЛЕНИЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА К КОРПУСУ ПРИ НЕНОМИНАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Метою статті є визначення величини додаткових електромагнітних сил (ЕМС), які створюються потоками розсіювання спинки осердя статора турбогенератора (ТГ) в елементах його кріплення до корпусу при роботі в неномінальних режимах за даними вібраційного контролю. Методика. У роботі використовували теорію електромагнітних полів, метод апроксимація поліномами, математичне моделювання в пакеті MathCAD-2000 professional, положення загальної теорії електричних машин. Результати. Виконано аналітичні та чисельні розрахунки додаткових величин ЕМС, створюваних потоками розсіювання спинки осердя статора в елементах кріплення ТГ до корпусу при роботі в неномінальних режимах, що визначається необхідністю нічних розвантажень енергосистеми. Встановлено значення цих сил ТГ при зміні видачі та споживання реактивної потужності і при зміні напруги. Наукова новизна. Вперше для ТГ, що працюють в неномінальних режимах, виконані оцінка і розрахунок додаткових ЕМС в елементах кріплення осердя ТГ до корпусу, які створюються потоками розсіювання спинки осердя статора і доповнюють дію основних ЕМС. Визначення цих зусиль актуально, тому що турбогенератори ТЕС України потужністю 200-300 МВт є маневреними потужностями і вирішують завдання підтримки коефіцієнта потужності енергосистеми. Практичне значення. Було встановлено, що якщо ТГ часто працюють в неномінальних режимах, знос систем кріплення осердя статора до корпусів більш значущий, ніж в разі їх роботи тільки в номінальних режимах. Отримані дані дозволять більш точно визначити обсяги проведення ремонтних робіт, скласти графіки їх проведення, визначити місця установки датчиків контролю, можуть бути використані на етапі проектування нових машин. Бібл. 6, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: турбогенератор, режим навантаження, неномінальний режим, електромагнітна сила, реактивна потужність, вузол кріплення осердя статора.

Целью статьи является определение величины дополнительных электромагнитных сил (ЭМС), которые создаются потоками рассеяния спинки сердечника статора турбогенератора (ТГ) в элементах его крепления к корпусу при работе в неномінальных режимах по данным вибрационного контроля. Методика. В работе использовали теорию электромагнитных полей, метод аппроксимация полиномами, математическое моделирование в пакете MathCAD-2000 professional, положения общей теории электрических машин. Результаты. Выполнены аналитические и численные расчеты дополнительных величин ЭМС, создаваемых потоками рассеяния спинки сердечника статора в элементах крепления ТГ к корпусу при работе в неномінальных режимах, что определяется необходимостью ночных разгрузок энергосистемы. Установлены значения этих сил ТГ при изменении выдачи и потребления реактивной мощности и при изменении напряжения. Научная новизна. Впервые для ТГ, работающих в неномінальных режимах, выполнены оценка и расчет дополнительных ЭМС в элементах крепления сердечника ТГ к корпусу, которые создаются потоками рассеяния спинки сердечника статора и дополняют действие основных ЭМС. Определение этих усилий актуально, т.к. турбогенераторы ТЭС Украины мощностью 200-300 МВт являются маневренными мощностями и решают задачу поддержания коэффициента мощности энергосистемы. Практическое значение. Было установлено, что если ТГ часто работают в неномінальных режимах, износ систем крепления сердечников статора к корпусам более значителен, чем в случае их работы только в номінальных режимах. Полученные данные позволят более точно определять объемы проведения ремонтных работ, составлять графики их проведения, определять места установки датчиков контроля, могут быть использованы на этапе проектирования новых машин. Библ. 6, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: турбогенератор, режим нагрузки, неномінальный режим, электромагнитная сила, реактивная мощность, узел крепления сердечника статора.

Введение. В настоящее время наблюдается высокая степень старения паркового оборудования тепловых электрических станций (ТЭС). Поэтому, с учетом национальной экономической ситуации, стратегической задачей для Украины является продление срока эксплуатации и повышение надежности длительно работающих турбогенераторов (ТГ), совершенствование их ремонтного обслуживания и оптимизация затрат на модернизацию и техническое перевооружение оборудования ТЭС и АЭС.

Одним из наиболее эффективных вариантов решения этих задач является повышение качества, внедрение и развитие новых, а также совершенствование существующих методов диагностики ТГ, обеспечивающих своевременное и полное выявление дефектов (в том числе и на ранней стадии их развития), а также полнота и качество их устранения. Надежность ТГ и его физический ресурс в значительной степени определяется техническим состоянием сердечника статора,

в том числе и системы его крепления к корпусу. Надежное выполнение узла крепления обеспечивает необходимый уровень жесткости сердечника, виброизоляция корпуса статора и фундамента от вибраций, вызванных электромагнитными силами (ЭМС) активной зоны. В свою очередь, надежная система крепления защищает сердечник статора от внешних вибраций, передаваемых от фундамента через опоры и подшипники скольжения к корпусу ТГ, что особенно важно в маневренных режимах работы [1, 2].

Целью статьи является определение величины дополнительных ЭМС, которые создаются потоками рассеяния спинки сердечника статора турбогенератора в элементах его крепления к корпусу при работе в неномінальных режимах по данным вибрационного контроля.

Основной материал исследования. Согласно статистическим данным, собранным эксплуатацион-

© В.В. Шевченко, А.Н. Минко, А.В. Строкоус

ным персоналом электростанций, о состоянии корпусов и сердечников статоров ТГ, которые длительное время работали в ненормальных режимах (при нагрузке 70, 50, 30 % от номинальной) на блоках ТЭС, установлено, что по сравнению с ТГ, которые работали только в номинальных режимах, величина вибрации выше. Вибрация корпуса статора контролируется периодически, а измерение вибрации элементов крепления активной стали сердечника статора к раме корпуса выполняется очень редко, только в случаях очевидных симптомов ухудшения их вибрационного состояния или при неудовлетворительном состоянии стальных конструкций статора (контактная коррозия, повреждение узлов крепления и др.), т.е. уже по факту наличия дефекта. В тоже время из опыта эксплуатации известно, что объем и эффективность ремонтных работ зависят от стадии развития дефекта.

Проведение обследования вибрации системы крепления сердечника связано с определенными трудностями, что определяется необходимостью учитывать конструкцию узлов выпуска водорода или воздуха, выводов измерительных систем из корпуса через газоплотные пальцы и другие элементы, наличием датчиков внутри генератора. Но, если устано-

вить систему вибромониторинга корпуса заранее, возможно своевременно обнаружить дефекты, которые могут привести к серьезным повреждениям и потребуют дорогого ремонта, а в отдельных случаях – полной замены генератора.

Обычно спектр вибрации, полученный по вибрационным сигналам, снятым с корпуса работающего генератора, включает в себя основную гармонику с частотой 100 Гц и ряд гармонических составляющих, кратных основной гармонике. Так, при проведении сервисного обслуживания турбогенераторов блока № 4 Гусиноозерской ГРЭС (2014 г.), блока № 1 Гомельской ТЭЦ-2 (2011 г., 2012 г.), блока № 15 Луганской ТЭС (2014 г.) и блока № 3 Зуевской ГРЭС (2013 г.), были выполнены измерения вибраций корпусов статоров. Было установлено, что в режимах, отличных от номинальных, вибрация была максимальной, особенно в средних сечениях корпусов. В табл. 1 представлены данные испытаний корпуса статора турбогенератора ТГВ-300-2У3 блока № 3 Зуевской ГРЭС. На рис. 1 приведена схема размещения контрольных датчиков с левой стороны «Л».

Датчики 1П – 9П правой части расположены симметрично.

Таблица 1

Вибрация корпуса статора ТГ блока № 3 Зуевской ГРЭС ТГВ-300-2У3

Мощность ТГ	Величина вибрации, 2А, мкм																	
	Номер точки																	
	1Л	2Л	3Л	4Л	5Л	6Л	7Л	8Л	9Л	1П	2П	3П	4П	5П	6П	7П	8П	9П
$P = 288 \text{ МВт}, Q = 60 \text{ МВАр}$	10	13	11	23	33	26	25	40	26	19	28	17	41	48	40	39	47	38
$P = 220 \text{ МВт}, Q = 52 \text{ МВАр}$	11	15	11	26	34	27	29	42	29	23	29	16	43	51	43	41	53	46
$P = 154 \text{ МВт}, Q = 52 \text{ МВАр}$	15	15	9	28	37	31	31	45	33	28	34	14	49	59	47	47	57	50



Рис. 1. Расположение точек измерения вибрации со стороны левой части корпуса ТГ (если смотреть со стороны контактных колец)

При исследованиях также было отмечено ослабление запрессовки шихтованных пакетов и более частое разрушение изоляции обмотки статора пазовой и лобовых частей, разрушение системы крепления сердечника статора к корпусу [3].

Для определения причин увеличения вибрации в ненормальных режимах рассмотрим изменения действия вихревых токов, которые наводятся в сердечнике статора и в элементах его крепления к корпусу ТГ. Эти токи, которые наводятся потоками рассеяния в элементах системы крепления шихтованного сердечника статора к корпусу, а, следовательно, и величина действующих на стяжные призмы ТГ электромагнитных сил, зависят от степени насыщенности спинки

сердечника. Значение потока рассеяния на единицу поверхности (потока, который вытесняется из сердечника в зону крепления к корпусу) может быть представлено [1, 2], Вб/м:

$$\Phi_{dis} = \frac{\mu_0 \cdot I_s \cdot \tau}{\pi} \cdot \left[1 + \left(\frac{R_s}{R_k} \right)^{2\delta} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{R_s}{R_k} \right)^{2\delta} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; H_s – амплитуда тангенциальной составляющей напряженности на поверхности спинки статора, А/м; R_s – наружный радиус спинки сердечника статора, м; τ – полюсное деление, м; R_k – внутренний радиус корпуса статора, м; $2p$ – число полюсов.

Т.о., поток, вытесняемый из сердечника, прямо пропорционален напряженности магнитного поля в спинке сердечника, которая, в свою очередь, зависит от индукции, т.е. от режима работы генератора [3].

При изменении режима работы изменяется температура активных и конструктивных частей статора, что влияет на их линейные размеры. Коэффициент линейного расширения стали составляет 0,12 – 0,15 мм на 1 °С [4]. При увеличении температуры сердечника статора на 30 °С, его линейные размеры увеличатся только на 0,04 % от начального значения. Поэтому

тепловым расширением линейных размеров призм, пакетов сердечника, системы крепления можно пренебречь. Также в расчетах можно пренебречь влиянием нагрева на сопротивление контуров замыкания вихревых токов [5].

Допустимые ненормальные режимы работы ТГ регламентированы инструкцией по эксплуатации и определяются по диаграмме допустимых нагрузок, [5]. Поэтому выбираем для характеристики режимов работы активную мощность (P), реактивную мощность (Q) и линейное напряжение обмотки статора (U_s). Определим аналитическую связь указанных параметров с величиной ЭМС, действующих на элементы крепления. Последовательность аналитического расчета электромагнитных сил подробно изложена в [2].

Амплитуда индукции магнитного поля на наружной линии спинки сердечника статора может быть определена:

$$B_s = \frac{E_r}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \omega_s \cdot k_0 \cdot S_s} \cdot k_c, \quad (2)$$

$$E_r = \sqrt{\left(\frac{U_s}{\sqrt{3}} + x_\sigma \cdot I_s \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \right)^2 + \left(x_\sigma \cdot I_s \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \right)^2}$$

При расчете значений напряженности в спинке сердечника и стяжных призм, индукции в поверхностном слое активной стали используются характеристики намагничивания соответствующих материалов, которые выбираются по таблицам [5], однако для решения поставленной задачи целесообразно представить их в виде функциональных зависимостей.

Амплитуда напряженности магнитного поля на поверхности спинки сердечника статора связана с величиной индукции нелинейной зависимостью и в диапазоне значений индукции 0,6 – 1,7 Тл с достаточной точностью аппроксимируется полиномом 6-й степени:

$$H_s = f(B_s) = \sum_{n=0}^6 h_n \cdot B_s^n. \quad (4)$$

Определяем амплитуду напряженности на верхней линии спинки сердечника статора, затем, находим значения магнитного потока, сцепленного с контуром элементов крепления и поверхности спинки, определяем наводимые им на призмах ЭДС. При расчете сопротивления контура формирования вихревого тока Z_k необходимо учитывать, что сопротивление призм Z_p и крайнего пакета зависит от степени насыщения материала.

Однако, принимая во внимание, что сопротивление контура замыкания вихревых током приблизительно на 80 % определяется значением сопротивления элементов крепления, в дальнейших расчетах сопротивления крайних пакетов сердечника считаем постоянными, влиянием насыщения активной стали на значение сопротивления контура Z_k пренебрегаем.

Относительная магнитная проницаемость материала призм μ_p также нелинейно зависит от напряженности и может быть представлена:

где f – частота тока сети; k_0 – обмоточный коэффициент; ω_s – число витков обмотки статора; S_s – сечение спинки статора; k_c – коэффициент, который характеризует неравномерность распределения индукции в спинке статора; E_r – ЭДС, которая наводится магнитными потоками рассеяния спинки сердечника статора в стяжных призмах в ненормальных режимах работы:

$$E_r = \sqrt{\left(\frac{U_s}{\sqrt{3}} + x_\sigma \cdot I_s \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \right)^2 + \left(x_\sigma \cdot I_s \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \right)^2}$$

Угол между векторами напряжения и тока статора, а так же ток статора, А:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}\right); \quad I_s = \frac{1}{U_s} \cdot \sqrt{\frac{P^2 + Q^2}{3}}. \quad (3)$$

С учетом (3), значение результирующей ЭДС в спинке статора и в элементах его крепления к корпусу:

$$\mu_p = \sum_{n=0}^6 m_n \cdot H_s^n. \quad (5)$$

Изменение магнитной проницаемости μ_p от напряженности для Ст 3, из которой выполняют призмы крепления, рассмотрено в интервале 100 – 1250 А/м.

Амплитуда индукции, которая соответствует значению напряженности H_s на поверхности спинки сердечника, может быть представлена:

$$B_{s, \max} = \sum_{n=0}^3 b_n \cdot H_{s, \max n}. \quad (6)$$

При исследовании зависимости величины ЭМС в различных режимах изменяем значение одного из параметров (P , Q , U_s) в пределах, определяемых диаграммой мощностей и типовой инструкцией по эксплуатации, в то время, как два других параметра не меняются.

Для проведения расчетов введем безразмерную величину ε_N , которая представляет собой отношение изменений ЭМС к изменению физических величин (P , Q , U_s) в одном из ненормальных режимов N : 70, 50 и 30 % нагрузки генератора от номинальной (100 %):

$$\varepsilon_N = \frac{(F_B - F_N) / F_b}{(N_B - N_N) / N_b}, \quad (7)$$

где N_B , N_N , N_b – верхнее граничное, нижнее граничное и базовое значения выбранного параметра N (P , Q или U_s), зависящего от режим работы ТГ; F_B , F_N , F_b – верхнее граничное, нижнее граничное и базовое значения ЭМС.

Примем изменения значения параметров, которые характеризуют изменения режимов (P , Q , U_s):

- 1) $P_N = 0$ МВт, $P_B = P_b = 300$ МВт;
- 2) $Q_N = -80$ МВАр, $Q_B = Q_b = 186$ МВАр;
- 3) $U_N = 0,95$ кВ, $U_B = U_b = U_{sN} = 20$ кВ.

Для проверки аналитически полученных результатов решаем поставленную задачу также численными методами, на разработанной математической модели с использованием пакета MathCAD-2000 Professional. Исследуем элемент крепления (призму), которая длительное время находилась в работе, в связи с чем металл был выработан: величины боковых зазоров крепления призмы принимаем равными 0,435 мм (данные, получены на турбогенераторах, который работает на блоке № 2 Змиевской ТЭС, [6]).

Выполним разложение распределения ЭМС, ее радиальной и тангенциальной составляющих в ряд Фурье:

$$F(\theta) = F_{\cos t} + \sum_{v=1}^N F_{v,m} \cdot \sin(v\theta) + \sum_{v=1}^N F_{v,m} \cdot \cos(v\theta),$$

где θ – угол нагрузки ТГ, эл. град; v – номер гармоники; $F_{v,m}$ – амплитуда v -ой гармоники ЭМС:

$$F_{v,m} = \sqrt{(F_{v,m}^s)^2 + (F_{v,m}^c)^2}, \text{ Н}$$

φ_v – фаза v -ой гармоники ЭМС

$$\varphi_v = \arctg\left(\frac{F_{v,m}^c}{F_{v,m}^s}\right),$$

где $F_{v,m}^s, F_{v,m}^c$ – коэффициенты ряда Фурье для нечетных и четных гармонических составляющих v -го порядка, изменяющихся от 1 до v .

Результаты расчета ЭМС, наведенных вихревыми токами в элементах крепления сердечника статора к корпусу, полученные аналитически и численными методами для различных режимов работы ТГ, приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Сравнение результатов аналитических расчетов и результатов, полученных численными методами, (табл. 2, рис. 2), позволяет сделать вывод, что полученные результаты достаточно близки. Это подтверждает достоверность проведенных расчетов.

Таблица 2

Результаты расчета ЭМС, действующих на элементы крепления сердечника статора к корпусу, полученные аналитически и численными методами для различных режимов работы ТГ

Влияние активной мощности			Влияние реактивной мощности			Влияние напряжения		
P , МВт	Величина амплитуды первой гармоники ЭМС, Н		Q , МВАр	Величина амплитуды первой гармоники ЭМС, Н		U_s , кВ	Величина амплитуды первой гармоники ЭМС, Н	
	Аналитический расчет	Численный расчет		Аналитический расчет	Численный расчет		Аналитический расчет	Численный расчет
0	104,8	179	-80	107,3	163,6	19	132,4	173,7
150	141,5	179	0	115,7	174,2	19,5	135	185
100	145,2	189	186	145,2	189	20	145,2	189
ε_N	0,03	0,053	ε_O	0,183	0,094	ε_P	1,763	1,619

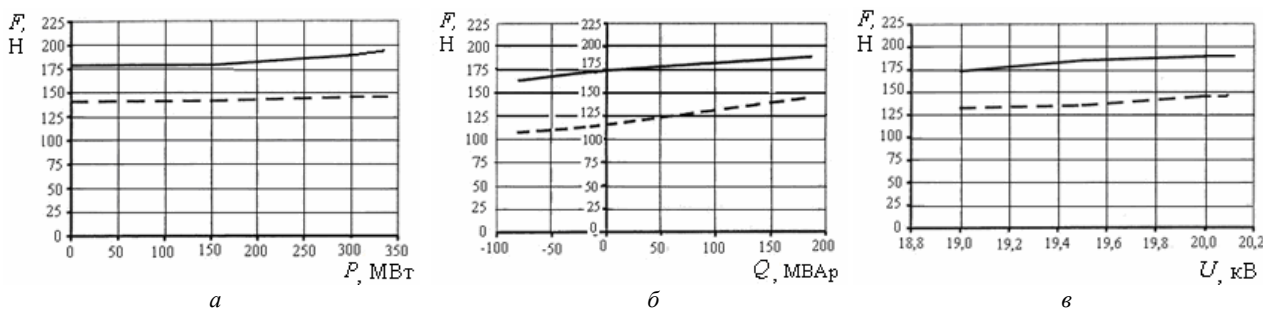


Рис. 2. Зависимость электромагнитных сил, действующих на систему крепления сердечника статора к корпусу от активной мощности (а), реактивной мощности (б) и напряжения статора (в) для различных режимов работы турбогенератора аналитическим и численным методами (--- данные аналитического расчета; — данные, полученные численными методами)

Выводы.

1. Результаты аналитических и численных расчетов показали, что при номинальных режимах работы ТГ (в пределах диаграммы нагрузок) величина ЭМС, действующих на элементы крепления сердечника статора, изменяется мало. Однако, при расчетах ЭМС в ненормальных режимах, ее изменение значительно. Так, для ТГ мощностью 300 МВт, максимальное изменение ЭМС отмечено при изменении реактивной мощности от наибольшего значения (+186 МВАр) до предельного значения потребляемой реактивной мощности (-80 МВАр), что составляет 13 % (по результатам численных расчетов).

2. Получены количественные характеристики изменение ЭМС в зависимости от величины активной P , реактивной мощности Q и от напряжения статора U_s . Установлено, что при ненормальных режимах работы ТГ, изменение величины этих сил практиче-

ски не зависит от активной и реактивной мощности: при изменении P и Q на 1 % изменение ЭМС составляет лишь сотые и десятые доли процента, соответственно. Зависимость величины ЭМС от напряжения более значительно, носит квадратичный характер (при изменении U_s на 2 % ЭМС возрастает приблизительно на 4 %).

3. При эксплуатации ТГ в ненормальных режимах износ систем крепления сердечника статора ТГ к корпусу более значителен, чем при их работе в номинальных режимах. Это необходимо учитывать при установлении датчиков контроля состояния ТГ в режиме on-line, при составлении графиков проведения ремонтных работ и определения их объемов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васковський Ю.М., Мельник А.М. Електромагнітні вібродбуджуючі сили турбогенератора в маневрених режи-

- мах роботи // Технічна електродинаміка. – 2016. – №2. – С. 35-41. doi: 10.15407/techned2016.02.035.
2. Кузнецов Д.В. Исследование электромагнитных сил, действующих на стержневые призмы сердечника статора турбогенератора // Электричество. – 2006. – №10. – С. 42-48.
 3. Моделирование электромагнитных полей в электрических устройствах / Под ред. А. Степанова, Р. Сикоры. – Киев: Техника, 1990. – 188 с.
 4. Griscenko M, Vitols R. Stator core vibration and temperature analysis of hydropower generation unit at 100 Hz frequency // Proceedings of 14th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. – 20-22 May, 2015, Jelgava, Latvia. – pp. 383-388.
 5. Shevchenko V.V., Strokous A.V. Forecasting the operating resource of turbogenerators on vibration control data // Norwegian Journal of development of the International Science. – 2017. – vol.1. – no.10. – pp. 78-83.
 6. Минко А.Н., Гордиенко В.Ю. Турбогенераторы с оптимальными массогабаритными параметрами взамен отработавших свой ресурс без разрушения исходного фундамента // Энергетика та електрифікація. – 2011. – №6. – С. 37-42.

REFERENCES

1. Vaskovskiy Yu.M., Melnyk A.M. The electromagnetic vibration disturbing forces of turbogenerator in maneuverable operating conditions. *Technical Electrodynamics*, 2016, no.2, pp. 35-41. (Ukr). doi: 10.15407/techned2016.02.035.
2. Kuznetsov D.V. Investigation of electromagnetic forces acting on the coupling prisms of the stator core of the turbogenerator. *Electricity*, 2006, no.10, pp. 42-48. (Rus).
3. Stepanov A., Sikora R. *Modelirovanie elektromagnitnyh polej v elektricheskikh ustrojstvakh* [Modeling of electromagnetic fields in electrical devices]. Kiev, Tehnika Publ., 1990. 188 p. (Rus).
4. Griscenko M, Vitols R. Stator core vibration and temperature analysis of hydropower generation unit at 100 Hz frequency. *Proceedings of 14th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. 20-22 May, 2015. Jelgava, Latvia, pp. 383-388.
5. Shevchenko V.V., Strokous A.V. Forecasting the operating resource of turbogenerators on vibration control data. *Norwegian Journal of development of the International Science*, 2017, vol.1, no.10, pp. 78-83. (Rus).
6. Minko A.N., Gordienko V.Yu. Turbogenerators with the optimal mass-size parameters in place of the exhausted resources without destroying the original foundation. *Energetic and electrification*, 2011, no.6, pp. 37-42. (Rus).

Поступила (received) 10.05.2018

Шевченко Валентина Владимировна¹, к.т.н., доц.,

Минко Александр Николаевич², к.т.н.,

Строкоус Антон Викторович¹,

¹Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,

тел/phone +380 50 4078454, +380 50 3016623,

e-mail: zurbagan8454@gmail.com, anton220579@gmail.com

²Частная научно-производственная фирма «Анкор-

Теплоэнерго»,

61105, Харьков, ул. Киргизская, 19, корпус 1,

тел/phone +380 97 7924889, e-mail: alexandr.minko@i.ua.

V.V. Shevchenko¹, A.N. Minko², A.V. Strokous¹

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Private Scientific and Production Company «Ankor-Teploenergo»,

19, Kirgizska Str., build 1, Kharkiv, 61105, Ukraine.

Analysis of electromagnetic vibration forces in the elements of the turbogenerator stator fastening to the case in non-nominal operation modes.

Purpose. The purpose of the paper is to determine the value of additional electromagnetic forces (EMF) that are created by the fluxes of scattering of the back of the turbogenerator (TG) stator core in the elements of its fastening to the case when operating in non-nominal modes according to the vibration control data. **Methodology.** The paper used the theory of electromagnetic fields, the method of polynomial approximation, mathematical modeling in the MathCAD-2000 professional package and the provisions of the general theory of electrical machines. **Results.** Analytical and numerical calculations of additional EMF values are performed, which were created by the leakage fluxes of the back of the stator core in the elements of fastening of the TG to the case when operating in non-nominal modes, which is determined by the need for night unloading of the power system. The values of these TG forces are established with a change in the output and consumption of reactive power and with a change in voltage. **Originality.** For the first time for TGs operating in non-nominal modes, the estimation and calculation of additional EMF in the elements of the TG core fastening to the case are carried out, which are created by the leakage fluxes of the back of the stator core and supplement the action of the basic EMF. The definition of these forces is relevant, because turbogenerators of TPPs in Ukraine with a capacity of 200-300 MW are maneuvering capacities and solve the problem of maintaining the power factor of the power system. **Practical value.** It was found that if the TGs often operate in non-nominal modes, the wear of the stator core fastening systems to the case is more significant than in the case of their operation only in nominal modes. The obtained data will allow to more accurately determine the scope of repair work, draw up schedules for their implementation, determine the locations of the sensors for monitoring, and can be used at the design stage of new machines. References 6, tables 2, figures 2.

Key words: turbogenerator, load mode, non-nominal mode, electromagnetic force, reactive power, stator core fastening unit.

B.I. Kuznetsov, T.B. Nikitina, V.V. Kolomiets, I.V. Bovdvi, A.V. Voloshko, E.V. Vinichenko

SYNTHESIS OF ROBUST ACTIVE SHIELDING SYSTEMS OF MAGNETIC FIELD GENERATED BY GROUP OF HIGH-VOLTAGE POWER LINES

Aim. The synthesis of robust active shielding system of magnetic field, generated by group of high voltage power lines for reducing the induction of the initial magnetic field to the sanitary standards level and reducing the sensitivity of the system to variations in the plant parameters is given. Methodology. The synthesis is based on the solution of a multi-criteria stochastic game, in which the gain vector is calculated on the basis of the Maxwell equations solutions in the quasi-stationary approximation. The equilibrium state of the game is based on the stochastic multiagent optimization algorithms of the multiswarm particles. The initial parameters for the synthesis of active shielding system are the location of the high voltage power lines with respect to the protected from transmission line space, geometry and number of cables, operating currents, as well as the size of the protected space and normative value magnetic field induction, which should be achieved as a result of screening. The objective of the synthesis of the active shielding system is to determine their number, configuration, spatial arrangement, wiring diagrams and compensation cables currents, setting algorithm of the control systems as well as the resulting value of the induction magnetic field at the points of the protected space. Results. Robust active shielding system synthesis results for reduction of a magnetic field generated by group of high voltage power lines is given. The possibility of a significant reduction in the level of induction of the magnetic field source within and reducing the sensitivity of the system to variations in the plant parameters is given. Originality. For the first time carried out the synthesis of the robust active shielding systems of magnetic field generated by group of high voltage power lines within a given region of space. Practical value. Practical recommendations on reasonable choice of the number and spatial arrangement of compensating cables of robust active shielding systems of the magnetic field generated by the group of high voltage power lines is given. References 18, figures 5.

Key words: high voltage power lines, power frequency magnetic field, robust active screening system, a multi-criteria stochastic game.

Цель. Проведен синтез робастной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого группой высоковольтных линий электропередачи для снижения индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм и уменьшения чувствительности системы к изменениям параметров системы. Методология. Синтез основан на решении многокритериальной стохастической игры, в которой векторный выигрыш вычисляется на основании решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении. Равновесное состояние игры находится на основе алгоритмов стохастической мультиагентной оптимизации мультироем частиц. Исходными параметрами для синтеза системы активного экранирования являются расположение высоковольтных линий электропередачи по отношению к защищаемому пространству, геометрические размеры, количество проводов и рабочие токи линии электропередачи, а также размеры защищаемого пространства и нормативное значение индукции магнитного поля, которое должно быть достигнуто в результате экранирования. Целью синтеза системы активного экранирования является определение количества, конфигурации, пространственного расположения, схем электропитания и токов компенсационных кабелей, алгоритма работы системы управления, а также результирующего значения индукционного магнитного поля в точках защищаемого пространства. Результаты. Приводятся результаты синтеза робастной системы активного экранирования для уменьшения магнитного поля, создаваемого группой высоковольтных линий электропередачи. Показана возможность существенного снижения уровня индукции исходного магнитного поля внутри заданного пространства и снижения чувствительности системы к изменениям параметров системы. Оригинальность. Впервые проведен синтез робастной системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого группой высоковольтных линий электропередач в данной области пространства. Практическая ценность. Приводятся практические рекомендации по обоснованному выбору количества и пространственного расположения компенсирующих обмоток робастных систем активного экранирования магнитного поля, создаваемого группой высоковольтных линий электропередач. Библ. 18, рис. 5.

Ключевые слова: высоковольтные линии электропередачи, магнитное поле промышленной частоты, робастная система активного экранирования, многокритериальная стохастическая игра.

Introduction. Methods of active contour shielding of power frequency magnetic field (MF) created by high voltage power lines (HVPL) [1-6] are the most acceptable and economically feasible for ensuring the sanitary norms of Ukraine in the magnetic field of the industrial frequency [7-8]. The method of synthesis of active shielding systems (ASS) for MF, created by air power lines, was developed in [9]. The initial data for the synthesis of the system is the parameters of the transmission lines (working currents, geometry and number of wires, location of the transmission lines relative to the protected space) and the dimensions of the protected space and the standard value of the induction of the MF, which should be achieved as a result of

screening. In the process of synthesis, it is necessary to determine the parameters of the compensation coil (their number, configuration, spatial arrangement, connection diagram), compensating coil currents and the resulting induction values of the MF at the points of the protected space, as well as the algorithm of the ASS. However, this method [9] does not take into account the uncertainty of the system parameters due to the inaccurately known model of the control object, as well as changes in the parameters of the system during its operation [10].

Ukraine's electricity networks are characterized by high density, and especially near high-voltage power substations. There is usually a group of overhead HVPL, in the immediate vicinity of which can be located

residential buildings. In this case, the main uncertainty in the synthesis of this system is the variation of the currents of different power lines, which leads not only to a change in the level of magnetic field induction, but also to a change in the position of the space-time characteristics (STC) of the MF in the shielding zone.

The goal of this work is the synthesis of robust active shielding systems of power frequency magnetic field created by group of high voltage power lines, which allows to reduce the magnetic field level to sanitary norms and to reduce the sensitivity of the system to variations of plant parameters.

Problem statement considers the formulation of the problem of synthesis of the robust ASS. In the synthesis of the ASS, the mathematical model of the original MF is known inaccurately [10]. In particular, currents in current conductors that have daily, weekly, seasonal variations are approximately known. The geometric dimensions of the compensating coil, the parameters of the regulators, etc. are not accurately realized. Therefore, we introduce a vector of deviations of the system parameters from their nominal values δ used in the synthesis of the system. The problem of synthesizing a robust ASS is reduced to the determination of such a vector of spatial arrangement and geometric sizes of compensated windings, as well as parameters of the regulator X and the vector of variable parameters δ , at which the maximum value of the magnetic field induction at selected points P_j of the considered space P assumes a minimum value for the regulator parameter vector X , but the maximum value for the vector of variable parameters δ so that

$$X^* = \arg \min_{X \in X} \max_{\delta \in \Delta} \max_{P_j \in P} B(X, \delta, P_j). \quad (1)$$

This technique corresponds to the standard approach to the synthesis of robust systems for the worst-case [10], when the variations of the parameters δ lead to the greatest deterioration in the compensation of the initial MF created by HVPL. The problem (1) can be formulated in the form of the following multi-criteria game [11] with vector gain

$$B(X, \delta) = [B(X, \delta, P_1), B(X, \delta, P_2), \dots, B(X, \delta, P_m)]^T, \quad (2)$$

the components of which $B(X, \delta, P_i)$ are the MF induction vector module in the m points P_i of the space under consideration. In this case, of course, it is necessary to take into account the constraints on the control vector and the state variables of the system, the vector of the unknown and variable parameters in the form of a vector inequality

$$G(X, \delta) \leq G_{\max}. \quad (3)$$

In the multi-criteria game (2), the first player is the parameter vector of the regulator X and its strategy is the minimization of the vector gain (2), and the second player is a vector δ of variable parameters characterizing the uncertainty of the plant parameters and the strategy of this player is maximization of the same vector gain [11].

Note that the components of the vector gain (2) are nonlinear functions of the required parameters vectors X and δ are calculated on the basis of the solutions of the Maxwell equations in the quasi-stationary approximation [12-16].

Method of synthesis. Consider the algorithm for finding the equilibrium of the game problem. To find the equilibrium state of the multi-criterion game (2) from Pareto-optimal solutions taking into account the preference relations [11], we construct an algorithm for stochastic multi-agent optimization based on the set of particle swarms [17], the number of which m is equal to the number of components of the vector gain (2). The motion of i particle of j swarm is described by the following expressions

$$v_{ij}(t+1) = w_j v_{ij}(t) + c_{1j} r_{1j}(t) H(p_{1j} - \varepsilon_{1j}(t)) [y_{ij}^*(t) - \dots] \quad (4)$$

$$[\dots - x_{ij}(t)] + c_{2j} r_{2j}(t) H(p_{2j} - \varepsilon_{2j}(t)) [y_j^*(t) - x_{ij}(t)]$$

$$u_{ij}(t+1) = w_j u_{ij}(t) + c_{1j} r_{1j}(t) H(p_{1j} - \varepsilon_{1j}(t)) [z_{ij}^*(t) - \dots] \quad (5)$$

$$[\dots - \delta_{ij}(t)] + c_{2j} r_{2j}(t) H(p_{2j} - \varepsilon_{2j}(t)) [z_j^*(t) - \delta_{ij}(t)]$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1)$$

$$\delta_{ij}(t+1) = \delta_{ij}(t) + u_{ij}(t+1), \quad (6)$$

where $x_{ij}(t)$, $\delta_{ij}(t)$ and $v_{ij}(t)$, $u_{ij}(t)$ is the position and velocity of i particle of j swarm; $y_{ij}(t)$, $z_{ij}(t)$ and y_j^* , z_j^* – the best local – lbest and global – gbest positions of the i -th particle, found respectively by only one i -th particle and all the particles of j swarm.

Moreover, the «best» position of the $-j$ particle of j swarm on a vector $x_{ij}(t)$ is understood in the sense of a minimum of the scalar gain $B(X, \delta, P_j)$, and by the vector $\delta_{ij}(t)$ is understood in the sense of the maximum of the same scalar gain. Positive constants c_1 , c_2 , random numbers $r_{1j}(t)$, $r_{2j}(t)$, inertia coefficients w_j and switching functions H are tuning parameters of the algorithm.

Note that in connection with the fact that the vector of the solutions of the game (2) is represented in the form of strategies of two players X – the vector of the parameters of the regulators and the δ – the vector of the variable parameters of the plant, where it is necessary to minimize the vector gain (2) along the regulators parameter vector X and maximize the same vector gain (2) with respect to the of plant parameters variable vector δ . Therefore, each i particles of j swarm has two components of position $x_{ij}(t)$, $\delta_{ij}(t)$ and two components of velocity $v_{ij}(t)$, $u_{ij}(t)$ to find the two desired components of the regulators parameters vector X and the variable parameters vector δ .

In conclusion, we note that the original multi-criteria game (2), (3), taking into account the algorithm for its solution (4) – (7), is a multi-criteria stochastic dynamic game, since it clearly has time and random search [6, 7].

Computer simulation results. Consider the result of synthesis of robust ASS of MF created by group of HVPL. This situation is typical for the outskirts of cities, where several power lines are suitable, as well as near power line substations. The layout of group of HVPL, compensating coil and screening zone of the system under consideration is shown in Fig. 1. In the immediate vicinity of the shielding zone there are two double-circuit 110 kV HVPL-1 and HVPL-2, a double-circuit 330 kV HVPL-3 and a single-circuit 330 kV HVPL-4.

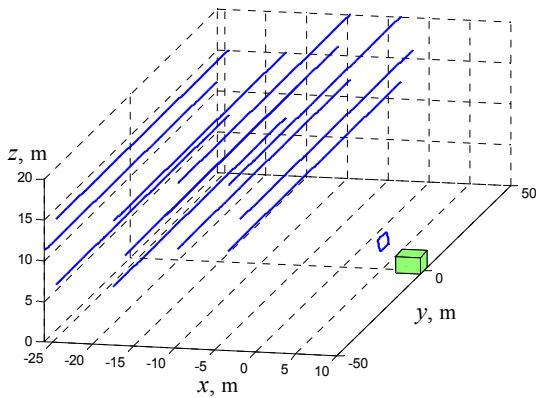


Fig. 1. Layout of group of high voltage power lines, compensating coil and screening zone

For the synthesis of ASS, in addition to the geometric dimensions of the transmission lines and the shielding zone, the values of the currents in the current conductors of the all HVPL are necessary. To this, first, experimental studies of the level of the magnetic field both in the shielding zone and near the transmission lines were carried out. Based on the obtained experimental data, the problem of current identification in current conductors of the power line is solved, under which the sum of the squares of the errors of the measured and model-them magnetic field induction values at given points is minimized.

In Fig. 2 shows the equal level lines of the initial magnetic field induction vector module.

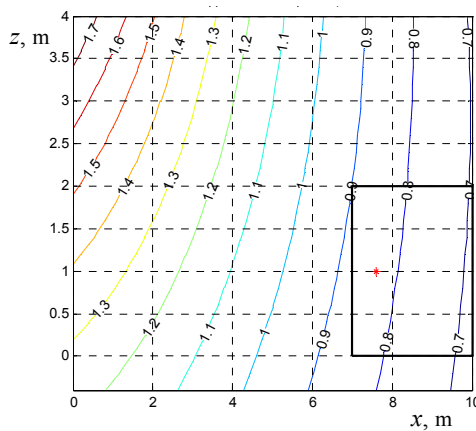


Fig. 2. Equal level lines of the initial magnetic field induction vector module

The MF initial induction generate by HVPL in the space under consideration is $0.9 \mu\text{T}$, which is 1.8 times higher than the MF sanitary standards of Ukraine.

Based on the model of MF created by group of HVPL, the problem of synthesis of a robust ASS was solved. The ASS contains one compensation coil.

On the basis of experimental research, it was found that in the shielding zone, the MF generated by group of HVPL has the space-time characteristics (STC) of such MF is a strongly elongated ellipse [9] and, consequently, the initial MF has a negligible polarization. Active screening of such MF is possible with the use of single compensation coil. It should be noted that such systems have become most widespread in the world practice [2].

In Fig. 3 shows the equal level lines of the compensation coil magnetic field induction vector: module (a), component along Z axes (b) and component along X axes (c) with the robust active screening system is on.

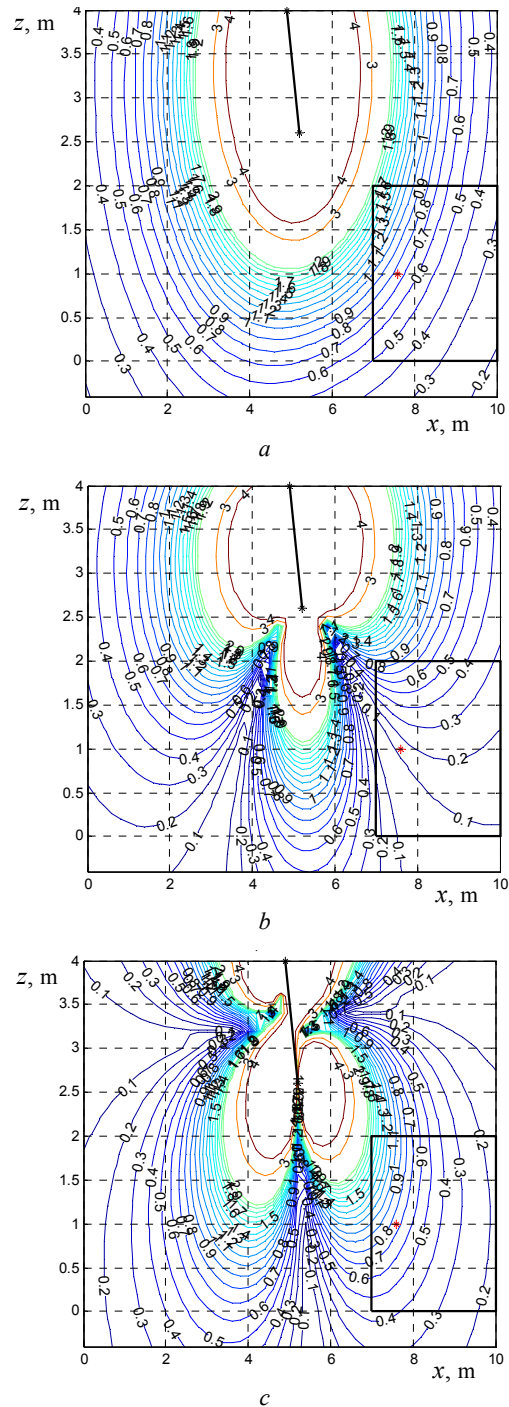


Fig. 3. Equal level lines of the compensation coil magnetic field induction vector: module (a), component along Z axes (b) and component along X axes (c) with the robust active screening system is on

In Fig. 4 shows the equal level lines of the magnetic field induction vector: module (a), component along Z axes (b) and component along X axes (c) with the robust active screening system is on. When the active shielding system is on, as can be seen from Fig. 3, the MF induction level in the residential space under consideration does not exceed $0.5 \mu\text{T}$.

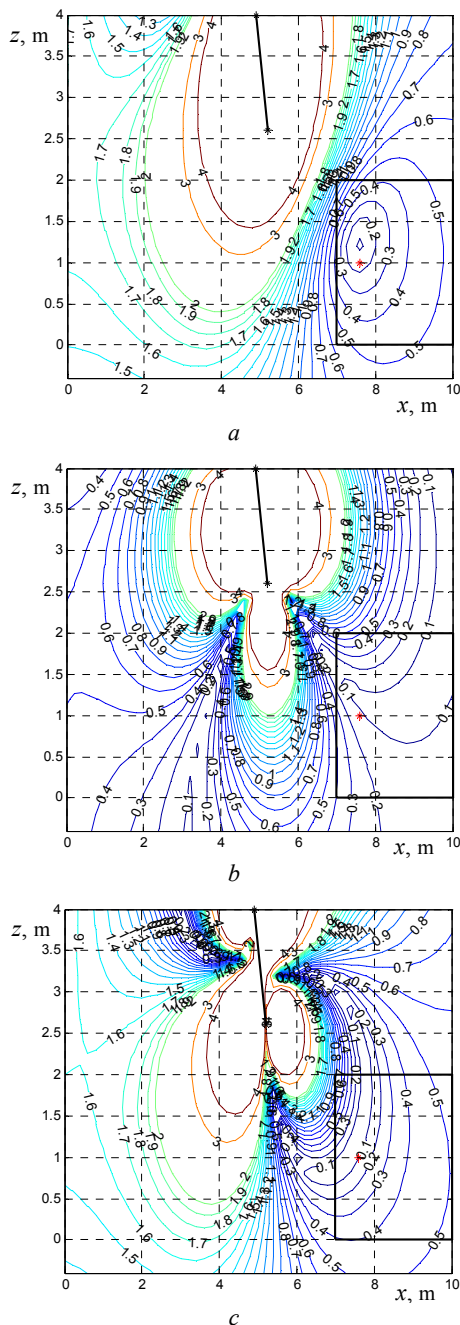


Fig. 4. Equal level lines of the magnetic field induction vector: module (a), component along Z axes (b) and component along X axes (c) with the robust active screening system is on

In Fig. 5 shows the STC of MF, created by group of HVPL (1); compensating coil (2) and total MF with the ASS is on (3). Naturally, such a MF can be effectively compensated for using a single-loop ASS. With single coil, the big axis of the STS ellipse of the initial MF is compensated, so that the STS of the total MF with the ASS is on is an ellipse with an ellipse coefficient 0.8.

In the robust system, the maximum value of the magnetic induction in the protected zone does not exceed $0.5 \mu\text{T}$, which corresponds to the sanitary norms of Ukraine [7]. For the worst-case scenario, when vector parameters variations lead to the greatest deterioration in the compensation of the initial magnetic field by a robust system, the maximum value of the level of magnetic induction in the protected zone increases by 10 %

compared to the robust system at nominal values of the parameters when the vector $\delta = 0$. In spite of the fact that in the initial optimal system with nominal values of the parameters, the maximum value of the level of magnetic induction in the protected zone is approximately 10 % less than in robust systems and is $0.4 \mu\text{T}$. However, when the vector of variable parameters is changed for the worst-case case, the maximum value of the level of magnetic induction in the initial optimal system increases to $0.6 \mu\text{T}$.

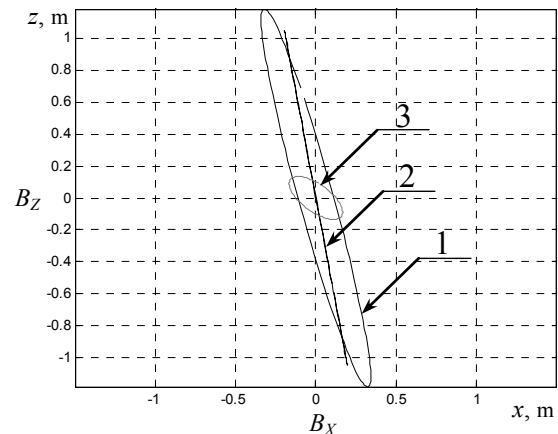


Fig. 5. Space-time characteristics of magnetic field: initial (1), compensation coil (2) and resultant magnetic field with the robust active screening system is on (3)

Note that the position of the compensating coil of the robust system, shown in Fig. 3, slightly differs from the position of the compensating coil of the optimal system [9]. Also, the parameters of the controllers of the robust and original optimal system are not significantly different, as a result of which the robustness of the synthesized system with respect to the optimal system is ensured.

Thus, the synthesized robust ASS makes it possible to reduce the sensitivity of the system to changes in the parameters of the control object in comparison with the initial ASS.

Experimental research results. Consider the field experimental research of the full scale ASS layout [18]. Compensation coil of the full scale ASS layout is a square shape, the upper branch of which is located at a height of 4 m from the ground, and the lower branch is located at a height of 2.6 m from the ground. The compensation coil contains 20 winds and is powered by amplifier type TDA7294.

The ASS contains an external MP induction controller and an internal current controller. An inductive sensor is used as an MF induction sensor, and the MP measurement is performed by EMF-828 type magnetometer of the Lutron Firm. The ASS is powered by an autonomous source. Field experimental research of a single-loop MF ASS with open and closed-loop control algorithms were carried out. The results of comparison of experimental and calculated of MP induction values in a residential zone are given. It is shown that the experimental and calculated MF induction values differ by not more than 10 %.

Conclusions.

1. For the first time the synthesis of robust active screening system of magnetic field, generated by group of

high voltage power lines for reducing the induction of the initial magnetic field to the sanitary standards level and reducing the sensitivity of the system to variations in the plant parameters is given.

2. The synthesis of a robust active screening system is based on multi-criteria stochastic game decision, the equilibrium state of which is based on multiswarm stochastic multi-agent optimization from Pareto-optimal solutions.

3. As a result of active screening system synthesis the spatial position of one compensation coil and the parameters of the regulator are determined. System reduce the level of the initial magnetic field induction throughout the considered residential area up to the Ukraine sanitary norms level and has less sensitivity to plant parameters variations in comparison with the known systems.

REFERENCES

1. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Pylugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Technical Electrodynamics*, 2013, no.2, pp. 3-9. (Rus).
2. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html> (accessed 10 September 2012).
3. Ter Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms. *Measurement Science and Technology*, 1993, Vol. 4, Issue 12, pp. 1370-1375. doi: 10.1088/0957-0233/4/12/010.
4. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, 2004, Vol.151, no.1, pp. 2-7. doi: 10.1049/ip-smt:20040002.
5. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. *HAIT Journal of Science and Engineering. Series B: Applied Sciences and Engineering*, Vol. 2, Issues 1-2, pp. 254-265.
6. Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. *9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9 CHLIE)*, Marbella (Málaga, Spain), 2005, pp. 84-99.
7. *Electrical installation regulations. 5th ed.* The Ministry of Energy and Coal Mining of Ukraine, 2014. 277 p. (Ukr).
8. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chunikhin K.V. Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines. *Technical electrodynamics*, 2016, no.3, pp. 6-8. (Rus).
9. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B.. Synthesis of an active shielding system of the magnetic field of power lines based on multiobjective optimization. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.6, pp. 26-30. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.05.
10. Ren Z., Pham M.-T., Koh C.S. Robust Global Optimization of Electromagnetic Devices With Uncertain Design Parameters: Comparison of the Worst Case Optimization Methods and Multiobjective Optimization Approach Using Gradient Index. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol.49, no.2, pp. 851-859. doi: 10.1109/tmag.2012.2212713.
11. Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games: Theory and Algorithms*. Amsterdam University Press, Amsterdam, 2010. 174 p. doi: 10.5117/9789085550402.
12. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pylugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. *Technical electrodynamics*, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).
13. Panchenko V.V., Maslii A.S., Pomazan D.P., Buriakovskiy S.G. Determination of pulsation factors of the system of suppression of interfering harmonics of a semiconductor converter. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.4, pp. 24-28. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.04.
14. Buriakovskiy S., Maslii An., Maslii Ar. Determining parameters of electric drive of a sleeper-type turnout based on electromagnet and linear inductor electric motor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol.4, no.1(82), pp. 32-41. (Rus). doi: 10.15587/1729-4061.2016.75860.
15. Zagirnyak M., Chorny O., Nykyforov V., Sakun O., Panchenko K. Experimental research of electromechanical and biological systems compatibility. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, no.1, pp. 128-131. doi: 10.15199/48.2016.01.31.
16. Buriakovskiy S.G., Maslii A.S., Panchenko V.V., Pomazan D.P., Denis I.V. The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.2, pp. 59-62. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2018.2.10.
17. Shoham Y., Leyton-Brown K. *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. Cambridge University Press, 2009. 504 p.
18. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B. Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop of active screening system of magnetic field of power line. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.1, pp. 16-20. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.03.

Received 10.05.2018

B.I. Kuznetsov¹, Doctor of Technical Science, Professor,
T.B. Nikitina², Doctor of Technical Science, Professor,
V.V. Kolomiets², Candidate of Technical Science,
I.V. Bovdui¹, Candidate of Technical Science,
A.V. Voloshko¹, Candidate of Technical Science,
E.V. Vinichenko¹, Candidate of Technical Science,
¹ State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine»,
19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine,
phone +380 50 5766900,
e-mail: kuznetsov.boris.i@gmail.com
² Kharkov National Automobile and Highway University,
25, Yaroslava Mudroho Str., Kharkov, 61002, Ukraine,
e-mail: tatjana55555@gmail.com

N.I. Suprunovska, M.A. Shcherba

METHOD FOR VOLTAGE CONTROL IN CHARGE CIRCUIT OF ELECTRIC DISCHARGE INSTALLATIONS WITH TWO CAPACITORS UNDER NONZERO INITIAL CONDITIONS

Purpose. To analyze the transient processes in the charge circuit of electric discharge installations with two capacitors, taking into account the change in the initial conditions of such processes (initial voltage on the capacitors and the initial current in the charge circuit) as well as to develop the method for charge voltage control of such installations using purposeful change of these initial conditions. Methodology. We have applied the concepts of theoretical electrical engineering, the principles of theory of electrical circuits, and mathematical simulation in the software package MathCAD 12. Results. We have obtained analytical expressions and graphical dependencies establishing a quantitative relationship between the value of the maximum charge voltage of an electric discharge installation and the values of the initial voltage on its capacitors and the initial current in the circuit. This allows us to propose the method for the charge voltage control of electric discharge installations with two reservoir capacitors, using a purposeful change in their initial voltages and initial current in the charge circuit. Originality. For the first time, we have found that the charge voltage of the installation can be controlled using two influence mechanisms – either changing the initial current in the charge circuit (by interrupting the transient process of the first capacitor charge at a certain time) or using a nonzero initial voltage on the charged second capacitor. In this case the charge voltage can be varied by 2 times. Practical value. The use of this method makes it possible to obtain discharge pulses of complex shape in the technological load, since the maximum charge voltages of the first capacitor and second one can differ by a factor of 1.5. References 10, figures 4.

Keywords: electric discharge installation, capacitor charge, charge voltage, transients, nonzero initial conditions.

Цель. Целью статьи является анализ переходных процессов в зарядной цепи электроразрядных установок с двумя конденсаторами с учетом изменения начальных условий протекания таких процессов (начального напряжения на конденсаторах и начального тока в зарядной цепи), а также разработка метода регулирования зарядного напряжения таких установок, используя целенаправленное изменение указанных начальных условий. Методика. Для проведения исследований использовались положения теоретической электротехники, теория электрических цепей, математическое моделирование в программном пакете MathCAD 12. Результаты. Получены аналитические выражения и графические зависимости, устанавливающие количественную связь между значением максимального зарядного напряжения установок и величинами начального напряжения на ее конденсаторах и начального тока в цепи. Предложен метод регулирования напряжения заряда электроразрядных установок с двумя накопительными конденсаторами, использующий целенаправленное изменение их начальных напряжений и начального тока в зарядной цепи. Научная новизна. Установлено, что напряжение заряда установки можно регулировать, используя два механизма влияния – как изменяя начальный ток в зарядной цепи (прерыванием переходного процесса заряда первого конденсатора в определенный момент времени), так и используя ненулевое начальное напряжение на заряжаемом втором конденсаторе. При этом напряжение заряда можно изменять в 2 раза. Практическое значение. Использование данного метода позволяет получить разрядные импульсы сложной формы в технологической нагрузке, поскольку максимальные напряжения заряда первого и второго конденсаторов могут отличаться в 1,5 раза. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: электроразрядная установка, заряд конденсатора, зарядное напряжение, переходные процессы, ненулевые начальные условия.

Introduction. Electric discharge installations (EDIs) with capacitive energy storage devices (reservoir capacitors) have found wide application in the development of new technologies for electric pulse treatment of materials and media (in particular, electro-erosion, electro-hydraulic, magneto-pulse treatments, etc.) [1-8].

The use of parallel connection of capacitors with different capacities is one of the most common methods for control of the EDIs dynamic parameters.

So, for example, several capacitors with different capacities, which are discharged through a load with a time delay, are used in many schemes of electric discharge installations in order to control the shape of the pulse currents in the load [1, 2, 9]. In the installations containing semiconductor DC voltage shapers with filtering capacitors of high-capacity, additional dosing capacitors are used to more accurately control the energy in the load [1, 7, 8, 10]. Additional low-capacity dosing capacitors are also used in the input circuits of semiconductor converters to stabilize

the power consumed by them from the electrical network [2, 3, 5, 10].

It should be noted that in most of considered electric discharge installations, the initial charge voltages and the final discharge voltages of their capacitors were equal to zero [1, 3-6].

At the same time, the reservoir capacitor is not completely discharged in the EDIs for volumetric electro-spark dispersion (VESD) of metal granules in a dielectric liquid. The residual voltage of the capacitor is used as information for changing the voltage of the subsequent charge of the capacitor [7]. In these installations, the dependence of the resistance of the electric spark load on the magnitude and duration of the discharge current is used for parametric stabilization of the dispersion modes [7, 8].

If an oscillatory discharge of the capacitor through the load occurs and the capacitor is partially recharged to a reverse polarity voltage, then the negative feedback

of the subsequent charge voltage of the capacitor with its previous discharge voltage is realized in the installation. If an aperiodic discharge occurs, then a positive feedback between these voltages is realized. In fact, high-speed control and parametric stabilization of electrical technological modes is implemented in such installations [7, 8].

Thus, the change in the magnitude and sign of the initial voltage of the capacitor can be used to develop methods for high-speed control of energy in the capacitor, discharge pulse parameters, EDIs efficiency, as well as for parametric stabilization of discharge processes in a circuit with a nonlinear load [7, 8].

The solution of the problems of improving the energy characteristics of such EDIs is much more complicated when you change the initial and final conditions of the transients in circuits of reservoir capacitors that are part of such installations.

In addition, the analysis of transient processes with a nonzero initial current in the charging circuit of the EDIs with several reservoir capacitors has not been carried out previously.

Therefore, **the purpose** of this paper is to analyze the transient processes in the charge circuit of electric discharge installations for the VESD with two reservoir capacitors, taking into account the change in the initial conditions of such processes (initial capacitors voltage and the initial current in the charge circuit), as well as to develop the method for control of the charge voltage of such installations using purposeful change of these initial conditions.

As a typical example of such EDIs, we have considered the installation for electro-spark dispersion of conductive granules in a dielectric liquid, the charge circuit of which includes two reservoir capacitors.

Features of the capacitor charge when the initial current changes. The electric schematic diagram of the charge circuit of the EDI, where the transient processes are analyzed, is shown in Fig. 1.

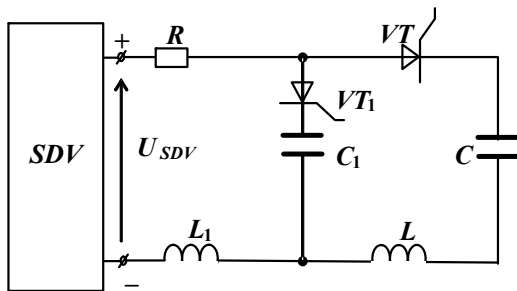


Fig.1. Electric schematic diagram of the charge circuit of EDI with two reservoir capacitors

The capacitor C (Fig. 1) is charged from a shaper of direct voltage (SDV) with an output voltage U_{SDV} through a resistor R , thyristor commutator VT , and inductance coils L and L_1 . The thyristor VT_1 was locked up to a certain time $t = t_1$. There is an oscillatory charge of capacitor C in the charge circuit, since the parameters of the circuit elements (R, C, L, L_1) were chosen in such a way as to realize high Q -factor of the circuit ($Q \geq 10$).

At time $t = t_1$, when the charge voltage of the capacitor C becomes higher than the SDV voltage $U_C > U_{SDV}$, the thyristor commutator VT_1 is unlocked.

The capacitor C_1 begins to charge from the SDV . We assume that in the general case there is some voltage on the capacitor C_1 ($U_{0C_1} \neq 0$) before starting its charge.

Since $U_C > U_{SDV}$, then the capacitor C tries to discharge to the capacitor C_1 , however, the occurrence of reverse current in the circuit leads to the locking of the thyristor VT . Inductance L is needed to limit the reverse current in the circuit when the thyristor VT is locked.

Thus, there are two transient processes in the charge circuit of an EDI with two capacitors: the first process is the charge of the capacitor C from the SDV in the time interval $0 \leq t \leq t_1$ and the second process is the charge of the capacitor C_1 from the SDV at $t > t_1$.

In the analysis of transient processes we have assumed that the thyristors VT and VT_1 are ideal switches (without energy losses and with instantaneous commutation), and the inductance value L is less by two orders of the inductance L_1 , therefore, value L can be ignored in the analysis of the first transient process.

Since the first transient is the ordinary oscillating charge of the capacitor C from the SDV under zero initial conditions, then we have analyzed in detail only the second transient process – the charge of the capacitor C_1 from the SDV , which occurs under a nonzero initial conditions in voltage U_{0C_1} and in current I_1 (due to the first transient process and the presence of inductance in the circuit) after switching thyristor VT_1 .

The initial current I_1 is determined by the known formulas for the oscillatory charge of the capacitor from a direct voltage source. The parameters of the charge circuit of the capacitor C_1 (R, C_1, L_1) are also chosen so there was an oscillatory transient process.

Transient analysis of the capacitor charge under nonzero initial voltage and current conditions. The initial time of the second transient process is $t = t_1$ and we denote it as t_0^* . The current time of this transient process, denoted by t^* , is defined as $t^* = t - t_1 = t - t_0^*$.

According to the second Kirchhoff's law the current in the $SDV-R-VT_1-C_1-L_1-SDV$ circuit (Fig. 1) is given by formula

$$i(t^*) = (U_{SDV} - u_{C_1}(t^*) - u_{L_1}(t^*)) / R, \quad (1)$$

here $u_{C_1}(t^*)$ and $u_{L_1}(t^*)$ are the voltage drop across the capacitor C_1 and the inductance L_1 , respectively.

Since $i(t^*) = C_1 du_{C_1}(t^*) / dt^*$, and $u_{L_1}(t^*) = L_1 di(t^*) / dt^* = L_1 C_1 d^2 u_{C_1}(t^*) / dt^{*2}$, then equation (1) can be reduced to the form:

$$\frac{d^2 u_{C_1}(t^*)}{dt^{*2}} + \frac{R}{L_1} \frac{du_{C_1}(t^*)}{dt^*} + \frac{du_{C_1}(t^*)}{L_1 C_1} = \frac{U_{SDV}}{L_1 C_1}. \quad (2)$$

Taking into account that in the general case there are the certain voltage $U_{0C_1} \neq 0$ on the capacitor C_1 before start of its charge and nonzero current of value I_1 in the circuit (determined in the first transient process of charging the capacitor C), then we can write the solution of such a non-uniform equation in the form:

$$u_{C_1}(t^*) = U_{SDV} + \left[\left\{ p_2 (U_{0C_1} - U_{SDV}) / (p_2 - p_1) - I_1 / C_1 \right\} e^{p_1 t^*} + \left\{ I_1 / C_1 - p_2 (U_{0C_1} - U_{SDV}) \right\} e^{p_2 t^*} \right] \quad (3)$$

Since $i(t^*) = C_1 du_{C_1}(t^*)/dt^*$, the expression for the current in the charge circuit can be written as:

$$i(t^*) = (U_{0C_1} - U_{SDV}) \left(e^{p_1 t^*} - e^{p_2 t^*} \right) / L_1 (p_2 - p_1) + I_1 \left(p_2 e^{p_2 t^*} - p_1 e^{p_1 t^*} \right) / (p_2 - p_1) \quad (4)$$

Since charge circuit parameters are selected so that the circuit has a high Q -factor, then there is an oscillatory transient process, and consequently the roots of the characteristic equation are conjugate complexes:

$$p_1 = -R/2L_1 + j\sqrt{1/L_1 C_1 - R^2/4L_1^2} = -b + j\omega,$$

$$p_2 = -R/2L_1 - j\sqrt{1/L_1 C_1 - R^2/4L_1^2} = -b - j\omega,$$

here $\omega = \sqrt{1/L_1 C_1 - R^2/4L_1^2}$, $b = R/2L_1$.

After substituting the values of p_1 and p_2 in (3) and (4) and performing the transformations, we obtain expressions for $u_{C_1}(t^*)$ and $i(t^*)$:

$$u_{C_1}(t^*) = U_{SDV} - \chi e^{-bt^*} \left((b/\omega - I_1/\omega \cdot \chi \cdot C_1) \sin \omega t^* + \cos \omega t^* \right) \quad (5)$$

$$i(t^*) = e^{-bt^*} \left[(\chi/L_1 \omega - I_1 b/\omega) \sin \omega t^* + I_1 \cos \omega t^* \right] \quad (6)$$

here $\chi = U_{SDV} - U_{0C_1}$.

The value of the current I_1 , which is the initial current for second transient (charge transient of the capacitor C_1), we determine by the formula for the oscillatory charge of the capacitor C (in general having some initial voltage U_{0C}) from the SDV :

$$I_1 = i(t = t_1) = (U_{SDV} - U_{0C}) e^{-bt_1} \cdot \sin \omega_1 t_1 / L_1 \omega_1 \quad (7)$$

here $\omega_1 = \sqrt{1/L_1 C - R^2/4L_1^2}$.

Calculations and data processing for the charge circuit (Fig. 1) with parameters $U_{SDV} = 500$ V, $L = 2 \cdot 10^{-6}$ H, $L_1 = 2 \cdot 10^{-4}$ H, $C = 10^{-4}$ F, $C_1 = 4 \cdot 10^{-5}$ F, $R = 0.1$ Ohm we have performed using the software package MathCAD 12. As mentioned above, the inductance L is two orders of magnitude smaller than L_1 , so we did not take it into account when performing calculations.

Table 1 shows the results of the calculation of the first transient process (the currents in the charge circuit and the charge voltage of capacitor C in the time interval from $t \approx \tau_{charge}/2$ (when the current is $I_1 = I_{1max}$) to $t = \tau_{charge}$ (when current $I_1 = 0$). Here τ_{charge} is the charge duration of capacitor C . These results are required for further analysis.

Analysis of the results of Table 1 shows that interrupting the charging process of capacitor C , when the charge circuit current reaches values in the range $I_{1max} \div 0$, we can change the control conditions of the charge voltage of the capacitor C , i.e. we can adjust the charge voltage (to perform so-called a tune-up) in the range of $7 \div 50$ %.

Fig. 2 represents the time dependence of the current in the charge circuit of the EDI $i(t^*)$ for various values

of the initial current I_1 : ($0, I_{1max}/2, 2I_{1max}/3, I_{1max}$) and the initial voltage $U_{0C_1} = 0$.

Table 1

The results of calculation of currents and charge voltages of capacitor C in the time interval from $t \approx \tau_{charge}/2$ to $t = \tau_{charge}$

$t_1 \cdot 10^{-6}$, s	$i(t_1)$, A	$u(t_1) = U_{Cmax}$, V
217.9	$I_1 = I_{1max} = 335$	469
337.9	$I_1 = 2I_{1max}/3 = 223$	824
366.9	$I_1 = I_{1max}/2 = 168$	881
444.4	$I_1 = 0$	947

$i(t^*)$, A for $U_{0C_1} = 0$

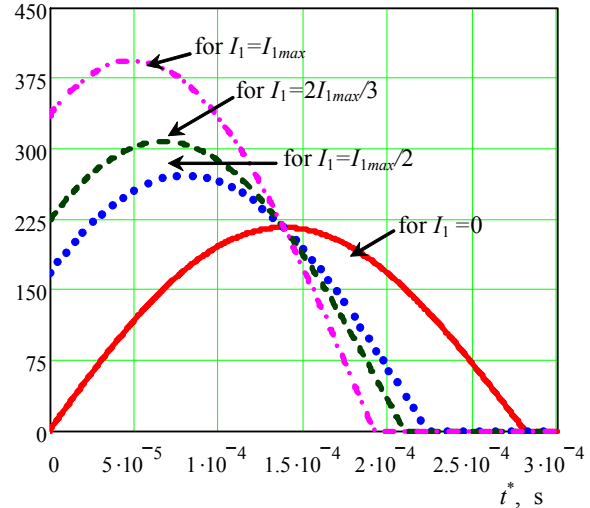


Fig. 2. The time variation in the charging current of capacitor C_1 with initial voltage $U_{0C_1} = 0$ at different initial circuit current values

As can be seen from Fig. 2, with a decrease in the value of the initial current I_1 the amplitude value of the current in the charge transient process of the capacitor C_1 decreases, and the duration of current flow increases. In other words, the earlier the first transient is interrupted, the faster and with the higher currents the second one proceeds.

Fig. 3, a-c shows the time dependence of the voltage $u_{C_1}(t^*)$, and Table 2 represents the values of the maximum charge voltage of the capacitor C_1 for different initial current I_1 ($0, I_{1max}/2, 2I_{1max}/3, I_{1max}$) and initial voltage U_{0C_1} ($0, U_{SDV}/2, 2U_{SDV}/3$).

Analyzing dependences shown in Fig. 3 and the data in Table 2, we can conclude that with a decrease in the initial current I_1 , the maximum charging voltage of the capacitor C_1 in the second transient process also decreases.

So if the initial current decreases from I_{1max} to zero, the voltage value U_{C_1max} decreases by 30 % at $U_{0C_1} = 0$ and by 47 % at $U_{0C_1} = 2U_{SDV}/3$. Thus, the magnitude of the initial voltage U_{0C_1} also affects the value of U_{C_1max} , and with increasing U_{0C_1} the voltage U_{C_1max} also decreases.

For example, if the initial voltage U_{0C_1} of the capacitor C_1 increases from zero to $2U_{SDV}/3$ when the value of the current in the $SDV-R-VT-C-L-L_1-SDV$ circuit $I_1 = I_{1max}$, the value of the maximum charge voltage U_{C_1max} of the capacitor C_1 decreases by 9 %, and at current value $I_1 = 0$ this voltage decreases by 32 %. In other words, the later the first charge transient of capacitor C is interrupted, and the higher initial voltage on capacitor C_1 , the lower its maximum charge voltage after second transient.

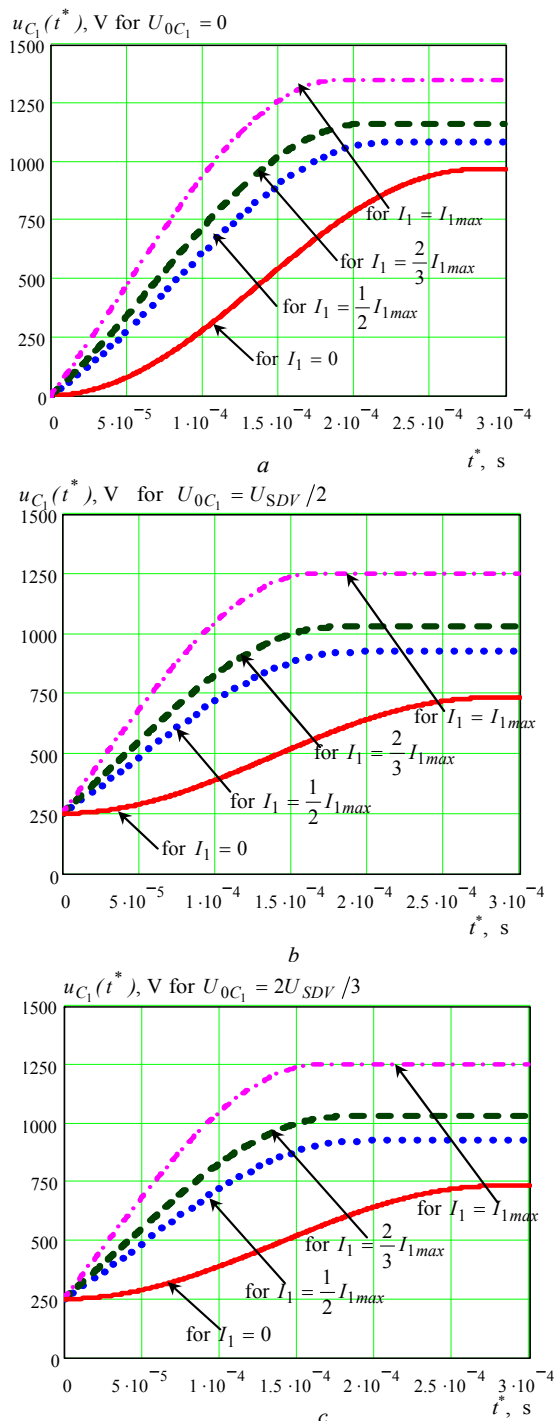


Fig. 3. The change with time of the charge voltage $u_{C_1}(t^*)$ of the capacitor C_1 at its various initial voltages and different initial values of the current in the circuit ($0, I_{1max}/2, 2I_{1max}/3, I_{1max}$): a – for $U_{0C_1} = 0$; b – for $U_{0C_1} = U_{SDV}/2$; c – $U_{0C_1} = 2U_{SDV}/3$

Fig. 4 represents the dependence of maximum voltage U_{C_1max} on the initial current I_1 for different initial voltages U_{0C_1} on the capacitor C_1 .

Table 2
Maximum charge voltage U_{C_1max} for different values I_1 and U_{0C_1}

U_{0C_1}, V	0	$U_{SDV}/2$	$2U_{SDV}/3$
$I_1 = I_{1max}$	1349	1252	1234
$I_1 = 2I_{1max}/3$	1163	1029	1001
$I_1 = I_{1max}/2$	1084	925	889
$I_1 = 0$	966	733	655

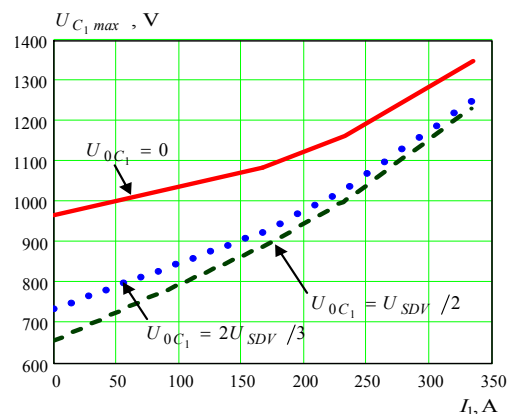


Fig. 4. The change in the maximum charge voltage U_{C_1max} of the capacitor C_1 as a function of the magnitude of the initial current I_1 , at which the transient of charge C_1 begins

As can be seen in Fig. 4, the charge voltage of the capacitor C_1 can be controlled by changing the initial current in its charge circuit by means of varying the duration of the charge process of the capacitor C .

The charge voltage of the capacitor C_1 can also be adjusted by changing its initial voltage before the start of the charge process. Of course, we can simultaneously use both methods for control of voltage U_{C_1max} . In this case, the control range can be $655 \div 1349$ V, that is, the charge voltage can be changed by 2 times.

The charge voltage of the capacitor C_1 can be almost 1.5 times higher than the charge voltage of the capacitor C (see Tables 1 and 2). This fact can be used to produce discharge pulses of complex shapes in spark load.

Conclusions.

1. We have carried out the transient analysis in the charge circuit of the capacitors of electric discharge installation, taking into account the change in the initial conditions of such transients (initial voltage on the capacitors and the initial current in the charging circuit). As the results we have defined the analytical expressions for determining the current in the circuit and the capacitor voltage during its charge under nonzero initial current and voltage conditions.

2. From the formula for the capacitor charge voltage under nonzero initial conditions in such installations follows that it depends on two factors: the initial voltage of this capacitor and the value of the initial current in this transient process. The numerical experiment of capacitor charge under nonzero initial conditions has shown that the

maximum capacitor voltage decreases both with increasing its initial voltage and with decreasing initial circuit current.

3. Based on the revealed dependencies, we proposed a method for charge voltage control of such installations by changing the initial current in the charge circuit (by interrupting the first transient at a certain time), and by using a nonzero initial voltage on the second charged capacitor. The difference in capacitors voltage of the installation can be used to produce discharge pulses of complex shape in the technological load.

REFERENCES

1. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of capacitive nonlinear- parametrical energy sources for discharge and pulse technologies. *Proceedings of the National University of Shipbuilding*, 2010, no.4, pp. 118-124. (Rus).
2. Onishchenko L., Gunko V., Grebennikov I., Bandura A. Capacitors for various electrophysical and technological pulsed power applications. *Proceedings of the 1st Intl Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials*. Tomsk, HCEI, 2000, vol.2, pp. 366-367.
3. Casanueva R., Azcondo F.J., Branas C., Bracho S. Analysis, Design and Experimental Results of a High-Frequency Power Supply for Spark Erosion. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2005, vol.20, no.2, pp. 361-369. doi: **10.1109/tpe.2004.842992**.
4. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Ruban A.S. Effect of the technological parameters of the melt treatment by a electric pulse current on the mixing process. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2012, vol.48, no.2, pp. 180-186. doi: **10.3103/s106837551202007x**.
5. Sen B., Kiyawat N., Singh P.K., Mitra S., Ye J.H., Purkait P. Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM). *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems PEDS 2003*. Singapore, 17-20 November 2003, vol.1, pp. 659-664. doi: **10.1109/PEDS.2003.1282955**.
6. Sunka P., Fuciman M., Babicky V., Clupek M., Benes J., Pouckova P., Soucek J. Generation of focused shock waves by multi-channel electrical discharges in water. *Conference Record of the Twenty-Fifth IEEE International Power Modulator Symposium*, Hollywood, California, USA, 2002, pp. 174-177. doi: **10.1109/MODSYM.2002.1189444**.
7. Suprunovska N.I. Analysis of interdependent charge-discharge processes of capacitor in circuits with positive voltage feedback. *Technical electrodynamics*, 2017, no.4, pp. 14-21. (Rus). doi: **10.15407/techned2017.04.014**.
8. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Cyclic transients in the circuits of electric discharge installations taking into account the influence of magnitude and rate of discharge currents rise on resistance of electric spark load. *Technical electrodynamics*, 2018, no.2, pp. 3-10. (Rus). doi: **10.15407/techned2018.02.003**.
9. Kim J.-S., Rim G.-H., Jin Y.-S., Lee H.-S., Suk H.-Y., Kim K.-S., Jung J.-W., Sung G.-Y. A flexible control scheme for current wave forming using multiple capacitor bank units. *PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference*. Digest of Papers (Cat. No.01CH37251). doi:**10.1109/ppps.2001.1001846**.
10. Suprunovska, N.I.; Shcherba, A.A. Features of the energy interchange between capacitors in the circuit using unidirectional commutator or bidirectional one. *Proceedings IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2016)*, June 7-11, 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 6-10. doi: **10.1109/IEPS.2016.7521843**.

Received 22.05.2018

N.I. Suprunovska¹, Doctor of Technical Science,
M.A. Shcherba¹, Candidate of Technical Science,
¹The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
56, prospekt Peremogy, Kiev, 03057, Ukraine,
phone +380 44 3662493,
e-mail: iednat1@gmail.com, m.shcherba@gmail.com

М.И. Баранов, С.Г. Буряковский, С.В. Рудаков

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В УКРАИНЕ ИСПЫТАНИЙ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ, АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСОВ ТОКА (НАПРЯЖЕНИЯ) ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ И КОММУТАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Викладено сучасне положення метрологічного забезпечення в Україні натурних випробувань об'єктів промислової енергетики, авіаційної і ракетно-космічної техніки на стійкість до прямої дії на них потужних імпульсів струму (напруги) штучної блискавки та аперіодичних комутаційних імпульсів напруги. Показано, що подібні випробування технічних об'єктів на блискавкостійкість та комутаційну стійкість можуть проводитися відповідно до вимог нормативних документів США SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5416: 2013, міжнародного стандарту IEC 62305-1: 2010 і стандарту ГОСТ 1516.2-97 в польових умовах на унікальних вітчизняних високовольтних сильнострумних електроустановках, які оснащені сучасними вимірювальними засобами. Описані основні технічні характеристики розроблених і створених в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» для метрологічного забезпечення натурних випробувань вказаних технічних об'єктів на блискавкостійкість та комутаційну стійкість: вимірювальних коаксіальних сильнострумних шунтів типу ШК-300М1 і ШК-300М2, ємнісних і омичних високовольтних та надвисоковольтних подільників напруги типу ЄПН-100, ЄПН-1,2, ОПН-1,2 і ОПН-2,5. Приведені приклади практичного використання при натурних випробуваннях на блискавкостійкість та комутаційну стійкість відмічених технічних об'єктів вказаних нестандартізованих вимірювальних засобів власного виготовлення. Бібл. 23, табл. 4, рис. 16.

Ключові слова: високовольтні генератори імпульсів струму (напруги) штучної блискавки і комутаційних імпульсів напруги, об'єкти енергетики, авіаційної і ракетно-космічної техніки, вимірювальні засоби для натурних випробувань технічних об'єктів на стійкість до дії імпульсів струму (напруги) штучної блискавки та комутаційних імпульсів напруги.

Изложено современное состояние метрологического обеспечения в Украине натурных испытаний объектов промышленной энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к прямому воздействию на них мощных импульсов тока (напряжения) искусственной молнии и аперiodических коммутационных импульсов напряжения. Показано, что подобные испытания технических объектов на молниестойкость и коммутационную стойкость могут проводиться в соответствии с требованиями нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5416: 2013, международного стандарта IEC 62305-1: 2010 и стандарта ГОСТ 1516.2-97 в полевых условиях на уникальных отечественных высоковольтных электроустановках, оснащенных современными измерительными средствами. Описаны основные технические характеристики разработанных и созданных в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» для метрологического обеспечения натурных испытаний указанных технических объектов на молниестойкость и коммутационную стойкость: измерительных коаксиальных силовых шунтов типа ШК-300М1 и ШК-300М2, емкостных и омических высоковольтных и сверхвысоковольтных делителей напряжения типа ЕДН-100, ЕДН-1,2, ОДН-1,2 и ОДН-2,5. Приведены примеры практического использования при натурных испытаниях на молниестойкость и коммутационную стойкость отмеченных технических объектов указанных нестандартизованных измерительных средств собственного изготовления. Библ. 23, табл. 4, рис. 16.

Ключевые слова: высоковольтные генераторы импульсов тока (напряжения) искусственной молнии и коммутационных импульсов напряжения, объекты энергетики, авиационной и ракетно-космической техники, измерительные средства для натурных испытаний технических объектов на стойкость к действию импульсов тока (напряжения) искусственной молнии и коммутационных импульсов напряжения.

Введение. В соответствии с требованиями действующих на сегодня нормативных документов США SAE ARP 5412:2013 [1], SAE ARP 5416:2013 [2] и международного стандарта IEC 62305-1:2010 [3] при натурных испытаниях объектов авиационной, ракетно-космической техники и энергетики на молниестойкость на последние от мощных высоковольтных генераторов тока молнии (ГТМ) подаются импульсы тока искусственной молнии с различными амплитудно-временными параметрами (АВП). При этом амплитуды I_{mL} протекающих через испытываемые объекты импульсов тока молнии могут изменяться от десятков ампер до сотен тысяч ампер, а их длительности τ_p – от сотен микросекунд до одной тысячи миллисекунд [1-3]. В документах [1-3] более подробно указаны численные значения нормированных АВП применяемых при испытаниях на молниестойкость рассматриваемых технических объектов импульсов тока искусственной молнии. В [4] авторами были описаны технические характеристики уникальных

отечественных мощных высоковольтных ГТМ, реализующих на практике требования документов [1-3]. Действующий стандарт ГОСТ 1516.2-97 [5] определяет нормированные АВП импульсов напряжения грозового происхождения и коммутационных аперiodических импульсов напряжения, используемых при испытаниях электрической прочности наружной (внутренней) изоляции объектов промышленной энергетики с емкостной характеристикой (например, выключателей, разъединителей, вводов, изоляторов, трансформаторов тока, конденсаторов и др.). В этом случае грозовой аперiodический импульс напряжения, формируемый на испытываемой нагрузке генератором импульсных напряжений (ГИН), построенным по классической схеме Аркадьева-Маркса, характеризуется временной формой $\tau_f/\tau_p=1,2$ мкс/50 мкс (при допусках по: фронту $\tau_f \pm 30\%$; амплитуде напряжения $U_{mL} \pm 3\%$; длительности импульса τ_p на уровне $0,5U_{mL} \pm 20\%$), нормированное максимальное значение кото-

© М.И. Баранов, С.Г. Буряковский, С.В. Рудаков

рого U_{mL} обычно не превышает 1 МВ [5]. Укажем, что амплитуда U_{mk} коммутационных аperiодических импульсов напряжения, воспроизводимых на электрической нагрузке генератором коммутационных импульсов напряжения (ГКИН), достигает уровня в несколько мегавольт. Время нарастания (подъема) T_{Π} таких импульсов напряжения до уровня U_{mk} составляет несколько сотен микросекунд, а их длительность T_p на уровне $0,5U_{mk}$ – до нескольких тысяч микросекунд [5]. Для оперативной регистрации АВП указанных импульсов тока и напряжения требуются соответствующие измерительные средства. Необходимо отметить, что отечественная промышленность подобных измерительных средств не производит. В этой связи разработчикам и создателям ГТМ, ГИН и ГКИН, а также обслуживающему их оперативному инженерно-техническому персоналу требуется самостоятельно решать вопросы метрологического обеспечения выполняемых с помощью указанных высоковольтных генераторов импульсов тока и напряжения договорных работ и прикладных научных исследований в рассматриваемой актуальной во всем мире научно-технической области техники и электрофизики больших токов и высоких (сверхвысоких) напряжений.

Целью статьи является изложение и анализ современного состояния метрологического обеспечения в Украине испытаний оборудования объектов промышленной энергетики на молниестойкость и коммутационную стойкость, а также объектов авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость.

1. Метрологическое обеспечение испытаний технических объектов на молниестойкость. Вначале остановимся на вопросах метрологического обеспечения испытаний объектов авиационной и ракетно-космической техники и энергетики на стойкость к воздействию на них импульсов тока искусственной молнии. Для объектов авиационной и ракетно-космической техники подобные испытания регламентируются требованиями нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 [1] и SAE ARP 5416: 2013 [2]. Согласно [1, 2] через испытываемые объекты указанной техники могут протекать следующие составляющие тока искусственной молнии, генерируемые в высоковольтных сильноточных цепях ГТМ: импульсная A - (или повторная импульсная D -), промежуточная B - и длительная C - (или укороченная длительная C^* -) компоненты тока искусственной молнии. Основные АВП данных компонент импульсного тока искусственной молнии приведены в табл. 1. Наиболее часто применяются следующие комбинации указанных компонент тока молнии [1, 2, 6]: A - , B - и C - компоненты; A - , B - и C^* - компоненты; D - , B - и C^* - компоненты.

Для объектов промышленной энергетики рассматриваемые высоковольтные сильноточные испытания на молниестойкость регламентируются требованиями международного стандарта IEC 62305-1:2010 [3] и разработанного в РФ на его основе национального стандарта ГОСТ Р МЭК 62305-1:2010 [7]. При этом от мощного ГТМ на испытываемый объект подается аperiодический импульс тока искусственной молнии временной формы $\tau_f/\tau_p=10$ мкс/350 мкс обеих полярностей, характерный для прямого короткого грозового удара в защищаемые рядом инженерных служб

энергоснабжающих компаний наземные объекты. В табл. 2 приведены основные АВП этого мощного испытательного импульса тока искусственной молнии.

Таблица 1
Нормированные АВП основных компонент импульсного тока искусственной молнии [1, 2, 4]

Компонента тока молнии	I_{mL} , кА	I_c , кА	q_L , Кл	J_L , 10^6 Дж/Ом	τ_f , мкс	τ_p , мс
A	200±20	–	–	2±0,4	≤50	≤0,5
B	–	2±0,4	10±1	–	–	5±0,5
C	0,2-0,8	–	200±40	–	–	$(0,25\pm 1)\cdot 10^3$
C^*	–	0,4	6-18	–	–	15-45
D	100±10	–	–	0,25±0,05	≤25	≤0,5

Примечание. I_{mL} – амплитуда импульса тока; I_c – среднее значение тока; q_L – количество протекшего через испытываемый объект электрического заряда; J_L – интеграл действия импульса тока; τ_f , τ_p – соответственно длительность фронта импульса между уровнями $(0,1-0,9)I_{mL}$ и импульса тока на уровне $\leq 0,1I_{mL}$.

Таблица 2
Нормированные АВП аperiодического импульса тока молнии временной формы 10 мкс/350 мкс [3, 4]

Наименование параметра импульса тока молнии	Уровень молниезащиты объекта по стандарту IEC 62305-1: 2010		
	I	II	III-IV
Длительность фронта τ_f , мкс	10±2	10±2	10±2
Длительность импульса на полуспаде τ_p (на уровне $0,5I_{mL}$), мкс	350±35	350±35	350±35
Амплитуда тока I_{mL} , кА	200±20	150±15	100±10
Интеграл действия J_L , 10^6 Дж/Ом	10±3,5	5,6±1,96	2,5±0,875
Заряд q_L , Кл	100±20	75±15	50±10

Что касается проведения испытаний электрической прочности наружной и внутренней изоляции объектов электроэнергетики к воздействию грозовых разрядов, то они согласно [5] выполняются с использованием указанного выше грозового импульса напряжения временной формы 1,2 мкс/50 мкс. При этом для его измерения нами могут применяться как измерительные стандартные шары диаметром от 125 мм до 1,5 м [8], так и высоковольтные емкостные (ЕДН) и омические (ОДН) делители напряжения на импульсные напряжения уровнем $\pm(0,1-2,5)$ МВ, имеющие в составе высоковольтные и низковольтные плечи [5, 9].

1.1. Измерительные коаксиальные дисковые шунты типа ШК-300М1 и ШК-300М2. Для регистрации импульсов тока искусственной молнии с АВП согласно данных табл. 1 и 2, генерируемых на испытываемых объектах мощными ГТМ [4], удовлетворяющими требованиям [1-3], в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в 2016 г. были разработаны и созданы специальные измерительные высоковольтные сильноточные дисковые шунты типа ШК-300М1 [10] (рис. 1) и ШК-300М2 [11] (рис. 2) коаксиальной конструкции. Подобные конструкции шунтов характеризуются малыми значениями их индуктивности (не более 10 нГн) и активного сопротивления (не более 0,2 мОм), что обеспечивает незначительное влияние собственных электрических параметров измерительного шунта на протекающие в нагрузке электромагнитные процессы. Существенным отличием конструкций данных сильноточных шунтов от известных (например, описанного в [6])

является применение в них вместо тонкостенного (толщиной не более 0,3 мм) высокоомного манганинового диска, с которого снимается падение импульсного напряжения от прохождения по нему измеряемого импульса тока, диска толщиной от 1 до 2 мм из нержавеющей стали марки 12X18H10T [10, 11].



Рис. 1. Внешний вид усовершенствованного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М1, предназначенного для измерения в микро- и миллисекундном диапазонах затухающих синусоидальных и аperiodических импульсов тока искусственной молнии амплитудой до ± 220 кА в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ГТМ с интегралом их действия до $3 \cdot 10^6$ Дж/Ом [10]

Такое техническое усовершенствование конструкции измерительного высокоомного диска в составе высоковольтного сильноточного шунта (см. рис. 1 и 2) позволило существенно повысить его электротермическую стойкость к протекающим по нему большим импульсным токам (БИТ) и избежать в нем развитие опасного для механической стойкости шунта явления электрического взрыва (ЭВ) его металла.



Рис. 2. Внешний вид усовершенствованного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, предназначенного для измерения в согласованном режиме работы его кабельной линии передачи сигнала в микро- и миллисекундном диапазонах импульсов тока искусственной молнии амплитудой до ± 220 кА в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГТМ с интегралом их действия до $15 \cdot 10^6$ Дж/Ом [11]

Как известно [12, 13], ЭВ металлического измерительного диска шунта при регистрации БИТ сопровождается резким повышением газодинамического давления внутри шунта (до сотен атмосфер [14]), обычно приводящим к его разрушению и выходу из строя. На рис. 3 приведен схематический вид конструкции шунта типа ШК-300М2 в продольном разрезе.

Для одновременного измерения нескольких компонент полного тока искусственной молнии, генери-

руемого в высоковольтной сильноточной разрядной цепи ГТМ, потребовалась разработка и создание специального измерительного согласующего делителя напряжения (СДН), включаемого на выходе дополнительно экранированной коаксиальной линии связи (рис. 4). В приведенном на рис. 4 делителе типа СДН-300 имеется два коаксиальных разъема 1:1 и 1:2, предназначенных для согласованного подсоединения их выходов ко входам измерительных каналов цифровых запоминающих осциллографов (ЦЗО) [6, 10].

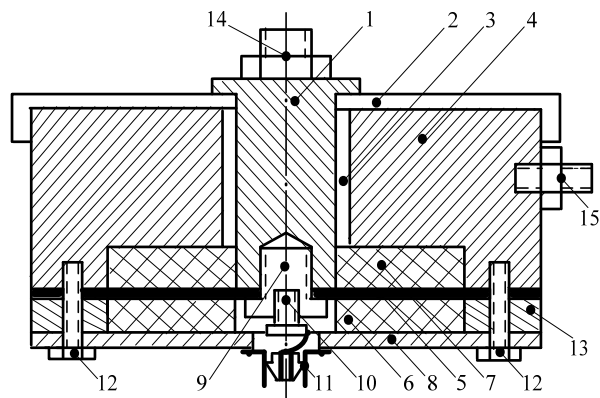


Рис. 3. Схематическое изображение конструкции коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2 в его продольном осевом разрезе (1 – массивный внутренний цилиндрический латунный электрод; 2, 3 – изоляционные втулки из фторопласта; 4 – массивный наружный цилиндрический латунный электрод; 5 – измерительный высокоомный стальной диск; 6, 7 – массивные прижимные изоляционные диски; 8 – бандажный латунный диск; 9, 10, 12 – стальные винты крепления; 11 – выходной коаксиальный разъем типа СР-75; 13 – массивное прижимное латунное кольцо; 14, 15 – соответственно входные (потенциальные) и выходные (заземленные) элементы латунного болтового подсоединения шунта к высоковольтной сильноточной разрядной цепи ГТМ) [11]



Рис. 4. Внешний вид измерительного шунта типа ШК-300М1, подсоединенного ко входу дополнительно экранированного коаксиального радиочастотного кабеля марки РК 75-7-11 длиной 70 м, выход которого подключен к экранированному согласующему делителю напряжения типа СДН-300 с двумя выходными коаксиальными разъемами 1:1 и 1:2 для согласованного подсоединения к ним измерительных каналов трех ЦЗО (например, серии Tektronix TDS 1012) при одновременной регистрации в сильноточной разрядной цепи ГТМ сразу трех компонент полного импульса тока искусственной молнии с различными АВП [6, 10]

На рис. 5 представлен общий вид размещения трех ЦЗО типа Tektronix TDS 1012 в заглубленном экранированном измерительном бункере при натур-

ных испытаниях объектов авиационной техники на прямое воздействие в них согласно [1, 2] тока молнии.



Рис. 5. Внешний вид размещения трех параллельно регистрирующих с одного измерительного шунта типа ШК-300М1 полезные электрические сигналы цифровых запоминающих осциллографов серии Tektronix TDS 1012 в заглубленном экранированном измерительном бункере, предназначенном для метрологического обеспечения натурных испытаний различных технических объектов на молниестойкость [9]

Отметим, что используемые нами ЦЗО при испытаниях технических объектов на молниестойкость имеют соответствующие сертификаты метрологической проверки и калибровки ГП «Харьковстандартметрология» (например, №08/2128К от 16.05.2017 г.).

В табл. 3 приведены основные технические характеристики описанных шунтов типа ШК-300М1 и ШК-300М2, прошедших государственную метрологическую аттестацию в ГП «Харьковстандартметрология» (акт проверки №06/184 от 27.06.2017 г. и сертификат соответствия №06/0206 от 19.07.2017 г.) [11].

Таблица 3

Основные технические характеристики высоковольтных сильноточных шунтов ШК-300М1 и ШК-300М2

Наименование шунта	Значение характеристики		
	R_S , мОм	K_S , А/В	Масса, кг
ШК-300М1	0,158±1 %	$K_{SA}=12625$	3,1
		$K_{SC}=6312$	
ШК-300М2	0,080±1 %	$K_{SA}=25000$	3,2
		$K_{SC}=12500$	

Примечание. R_S – активное сопротивление диска шунта, мОм; $K_S=2/R_S$ – коэффициент преобразования шунта, А/В; K_{SA} – коэффициент преобразования шунта при измерении в разрядной цепи ГТМ АВП А- и D- компонент тока молнии и грозового импульса формы 10 мкс/350 мкс, А/В (с коаксиального разъема 1:1 делителя СДН-300); K_{SC} – коэффициент преобразования шунта при измерении в разрядной цепи ГТМ АВП В-, С- и С*- компонент тока искусственной молнии, А/В (с коаксиального разъема 1:2 делителя СДН-300).

Используя данные табл. 3 и показания (в долях или единицах вольт) регистрируемого на экране ЦЗО с измерительного шунта падения импульсного напряжения U_S , искомое значение силы I_{mL} измеряемого импульса тока молнии определяем в виде: $I_{mL}=K_S U_S$.

1.2. Емкостные и омические делители напряжения типа ЕДН-100, ЕДН-1,2, ОДН-1,2 и ОДН-2,5. В 2011 г. при изучении поведения образцов высоковольтной изоляции (в частности, из древесины) испы-

тательных электроустановок отдела №4 института в условиях воздействия на них больших импульсных токов и высоких напряжений нам оказался необходимым малогабаритный передвижной емкостный делитель импульсного напряжения амплитудой до ±100 кВ (ЕДН-100), функционирующий в микросекундном временном диапазоне. На рис. 6 приведена схема подключения ЕДН-100 к измерительной цепи установки.

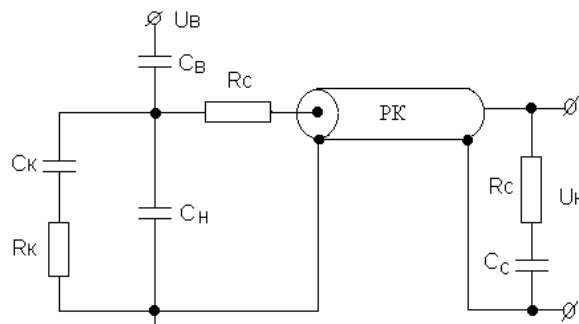


Рис. 6. Схема подсоединения ЕДН-100 ко входу ЦЗО [15]

Схема измерения на рис. 6 высокого напряжения U_B , подаваемого на высоковольтное плечо делителя емкостью C_B , последовательно соединенное с низковольтным плечом делителя емкостью $C_H \gg C_B$, базируется на согласованном режиме работы измерительной цепи ЕДН-100. Для реализации этого режима используется включение в цепь жилы коаксиального радиочастотного кабеля (ПК) с волновым сопротивлением Z_B линии передачи полезного электрического сигнала с низковольтного плеча делителя согласующего активного сопротивления $R_C=Z_B$ и подключение на низковольтной стороне схемы с напряжением U_H согласующей $R_C C_C$ – цепочки (см. рис. 6). Укажем, что включение сопротивления R_C согласно схемы на рис. 6 уменьшает вдвое полезный сигнал с уровнем напряжения U_H , подаваемый на измерительный канал ЦЗО. Для улучшения передаточных характеристик рассматриваемого делителя его низковольтное плечо содержит корректирующую $R_k C_k$ – цепочку. В соответствии со схемой рис. 6 были использованы следующие численные значения основных электрических параметров делителя ЕДН-100 (рис. 7): $C_B=0,47$ нФ; $C_H=C_C=0,54$ мкФ; $R_C=Z_B=75$ Ом; $R_k=27$ Ом; $C_k=2,8$ нФ.

Укажем, что при создании высоковольтного плеча делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 были применены высоковольтные керамические конденсаторы типа К-15-10 (емкостью 4700 пФ на номинальное напряжение ±50 кВ). В этой связи емкость C_B состояла из 10 шт. последовательно соединенных конденсаторов указанного типа, размещенных на воздухе в изоляционной трубе из СТЭФ (длиной 915 мм и внутренним диаметром 151 мм с толщиной стенки 12 мм). Низковольтное плечо рассматриваемого делителя емкостью $C_H=0,54$ мкФ было реализовано на основе двух параллельно соединенных конденсаторов типа К-73-11 емкостью 0,27 мкФ на напряжение 250 В [15]. Согласующее активное сопротивление R_C было собрано из двух параллельно включенных резисторов типа МЛТ-2 номиналом 150 Ом. Электрическая часть низковольтного плеча описываемого делителя размещалась в прямоугольном алюминиевом корпусе с ко-

аксиальным разъемом типа СР-75, жестко закрепленном на изоляционном основании делителя и подсоединенном к заземляющей шине испытательной установки. Расчетное значение коэффициента деления для ЕДН-100 в схеме согласно рис. 6 численно составляло $K_{D1}=2C_H/C_B=2298$. Выполненные высоковольтные эксперименты показали, что опытное значение коэффициента деления ЕДН-100 равняется $K_{D2}\approx 2515$ [15].

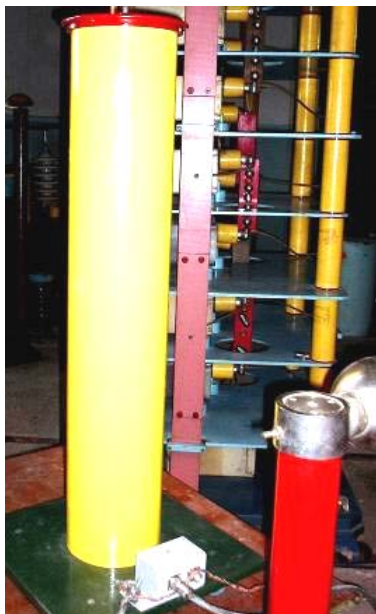


Рис. 7. Общий вид передвижного высоковольтного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 на номинальное напряжение ± 100 кВ, размещенного на испытательном поле сверхвысоковольтного генератора импульсных напряжений типа ГИН-1,2 этажерочной конструкции собственной разработки (генератор ГИН-1,2 размещен за делителем ЕДН-100; справа от делителя ЕДН-100 расположены передвижные стандартные измерительные шары диаметром 125 мм) [15]

На рис. 8 приведена электрическая схема с применением сверхвысоковольтного емкостного делителя напряжения типа ЕДН-1,2, предназначенная для формирования на длинном воздушном промежутке между электродами \mathcal{E}_1 (диском) и \mathcal{E}_2 (стержнем) нестандартного коммутационного аperiodического импульса напряжения временной формы 250 мкс/5000 мкс амплитудой до ± 1 МВ [16]. В этой схеме делитель ЕДН-1,2 на номинальное напряжение $\pm 1,2$ МВ выполняет не только роль измерительного средства, но и роль сверхвысоковольтной формирующей емкости.

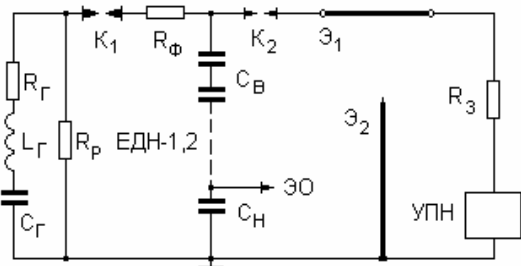


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема формирования в разрядной цепи генератора типа ГИН-1,2 на длинном воздушном промежутке коммутационного аperiodического импульса напряжения временной формы 250 мкс/5000 мкс амплитудой до ± 1 МВ, базирующаяся на использовании в ней емкостного делителя напряжения типа ЕДН-1,2 [16]

В схеме согласно рис. 8 на потенциальный электрод \mathcal{E}_1 воздушного промежутка от установки постоянного напряжения (УПН) через защитное сопротивление R_3 величиной 1,4 ГОм (14 резисторов типа КЭВ-5-100 МОм общей длиной 2,05 м) может подаваться постоянное напряжение уровнем до ± 50 кВ. Генератор импульсных напряжений типа ГИН-1,2 имел следующие собственные электрические параметры [16]: $R_I=48$ Ом; $L_I=6$ мкГн; $C_I=20,8$ нФ; разрядное сопротивление $R_P=340$ кОм. Фронтное активное сопротивление R_Φ , включенное в схему на рис. 8 между отсекающим K_1 и разделительным K_2 коммутаторами, составляло 360 кОм. Емкость C_B высоковольтного плеча делителя ЕДН-1,2 была выбрана равной 130 пФ, а емкость C_H его низковольтного плеча, подключаемого к ЭО или ЦЗО, – 2,6 мкФ. При этом расчетный коэффициент деления для ЕДН-1,2 имел численное значение, равное $K_{DC}=C_H/C_B=20\cdot 10^3$ [16].

На рис. 9 приведен общий вид высоковольтного испытательного стенда, использующего в основе своего построения электрическую схему согласно рис. 8 с емкостным делителем напряжения типа ЕДН-1,2.



Рис. 9. Общий вид высоковольтного испытательного стенда НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», предназначенного для испытания средств молниезащиты технических объектов коммутационным аperiodическим импульсом напряжения амплитудой до ± 1 МВ временной формы 250 мкс/5000 мкс и содержащего в схеме передвижной сверхвысоковольтный емкостный делитель напряжения типа ЕДН-1,2 [16]

На рис. 10 показан общий вид разработанного и созданного в отделе №4 института сверхвысоковольтного омического делителя напряжения ОДН-1,2.

Изоляционная несущая конструкция (ИНК) делителя ОДН-1,2 собрана из пяти жестко закрепленных между собой в одну стойку полых стеклопластиковых секций, внутри которых на гетинаксовых пластинах были размещены высоковольтные керамические резисторы типа ТВО-5-250 Ом [17]. Каждая секция делителя содержит 40 шт. последовательно и зигзагообразно соединенных с обеих сторон гетинаксовой пластины указанных резисторов с общим активным сопротивлением 10 кОм. В случае использования в делителе четырех указанных секций может быть реализована конструкция омического делителя типа ОДН-1 на номинальное напряжение ± 1 МВ (рис. 11) [17].



Рис. 10. Общий вид передвижного сверхвысоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-1,2 на номинальное напряжение $\pm 1,2$ МВ, размещенного на заводском испытательном поле высоковольтного испытательного стенда СВИ-1,2, предназначенного для определения в лабораторных условиях импульсной электрической прочности полимерной изоляции собственного производства (предприятие ЕС «Полимер», г. Бахмут, Украина, 2006 г.) [9, 17]



Рис. 11. Общий вид высоковольтного испытательного стенда НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», на испытательном поле которого размещены передвижные генератор импульсных напряжений типа ГИН-1,2, делитель типа ОДН-1 и стандартные измерительные шары диаметром 250 мм [17]

Для делителя типа ОДН-1,2 высоковольтное плечо характеризуется активным сопротивлением $R_B=50$ кОм. Его низковольтное плечо выполнено из двух парал-

лельно соединенных резисторов типа МЛТ-2 с общим активным сопротивлением $R_H=2,5$ Ом. В этой связи расчетный коэффициент деления для делителя ОДН-1,2 составляет $K_{DR}=R_B/R_H=20 \cdot 10^3$. При практическом использовании в измерительном тракте, подключаемом к низковольтному плечу делителя типа ОДН-1,2, схемы согласования, которая аналогична изображенной на рис. 6, коэффициент его деления K_{DR} удваивается и численно составляет примерно $40 \cdot 10^3$. Экспериментальная проверка величины K_{DR} с использованием согласно требованиям [8] стандартных измерительных шаров диаметром 250 мм (см. рис. 11) показала, что она принимает численное значение, равное примерно $39,8 \cdot 10^3$. Из рис. 10 и 11 видно, что сверху ИНК делителей типа ОДН-1,2 и ОДН-1 установлены противокоронные металлические экраны, улучшающие одновременно и распределение сильного электрического поля вдоль их верхних секций [17].

Применение в разрядной цепи приведенного на рис. 8 и 11 генератора импульсных напряжений типа ГИН-1,2 на номинальное напряжение $\pm 1,2$ МВ с собственным разрядным сопротивлением $R_P=240$ кОм и дополнительным формирующим сопротивлением $R_\Phi=1,98$ кОм (рис. 12) омического делителя напряжения типа ОДН-1,2 (или ОДН-1) позволяет на испытываемой твердой, жидкой или газовой изоляции объекта электроэнергетики формировать согласно требований [5] стандартную грозовую аperiодическую волну напряжения временной формы 1,2 мкс/50 мкс с указанными ранее допусками и требуемыми значениями ее амплитуды $U_{ml} \leq \pm 1$ МВ [16, 18]. При этом в расчетной схеме формирования стандартного грозового импульса формы 1,2 мкс/50 мкс следует учитывать емкостной характер нагрузки ($C_H \approx 10$ пФ) и паразитную емкость делителя ОДН-1,2, равную примерно 50 пФ.

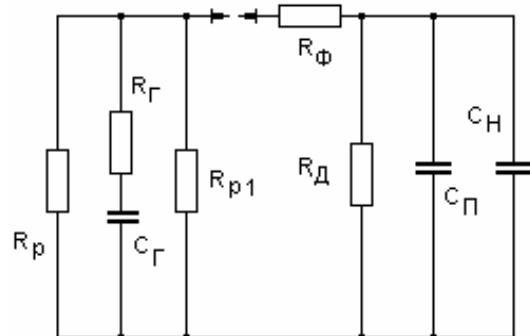


Рис. 12. Электрическая схема для получения в разрядной цепи генератора ГИН-1,2 на испытываемой нагрузке с емкостной характеристикой стандартного грозового импульса напряжения временной формы 1,2 мкс/50 мкс с применением омического делителя напряжения типа ОДН-1,2 с активным сопротивлением $R_D=50$ кОм ($R_P=240$ кОм – собственное разрядное сопротивление ГИН-1,2; $R_{P1}=3,91$ кОм – дополнительное разрядное сопротивление ГИН-1,2; $R_\Gamma=48$ Ом; $C_\Gamma=20,8$ нФ; $R_\Phi=1,98$ кОм; $C_H \approx 10$ пФ; $C_H \approx 50$ пФ) [9, 18]

Применение в разрядной цепи генератора импульсных напряжений типа ГИН-1,2 на номинальное напряжение $\pm 1,2$ МВ емкостного делителя напряжения типа ОДН-1,2 (рис. 13) позволяет на испытываемой электрической нагрузке с указанной емкостной характеристикой ($C_H \approx 10$ пФ) формировать стандартный

коммутационный импульс напряжения временной формы 250 мкс/2500 мкс амплитудой $U_{mk} \leq \pm 700$ кВ с нормированными допусками (для длительности подъема – ± 20 %; для длительности полуспада – ± 30 %; для амплитуды U_{mk} – ± 3 %) [5, 18]. Необходимо указать, что передвижной емкостный делитель напряжения типа ЕДН-1,2 содержит три последовательно включенные С- секции, каждая из которых помещена в стеклопластиковую трубу марки ТСЭФ длиной 900 мм и наружным диаметром 300 мм с толщиной стенки 35 мм. Каждая его С- секция состоит из 12 последовательно соединенных высоковольтных керамических конденсаторов типа К 15-10-4700 пФ на ± 50 кВ. Причем, каждая из указанных секций делителя залита трансформаторным маслом марки Т-1500, а ее верхний и нижний выходы подключены к круглым металлическим фланцам диаметром 350 мм [16, 18].

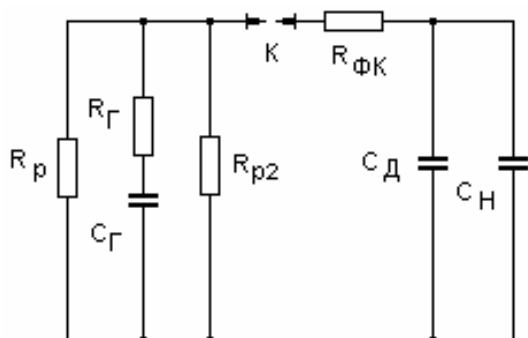


Рис. 13. Электрическая схема для получения в разрядной цепи генератора ГИН-1,2 на испытываемой нагрузке с емкостной характеристикой стандартного коммутационного импульса напряжения временной формы 250 мкс/2500 мкс с применением емкостного делителя напряжения типа ЕДН-1,2 с общей емкостью $C_Д=130$ пФ ($R_Г=240$ кОм – собственное разрядное сопротивление ГИН-1,2; $R_{p2}=840$ кОм – дополнительное разрядное сопротивление ГИН-1,2; $R_Г=48$ Ом; $C_Г=20,8$ нФ; $R_{ФК}=395$ кОм; $C_Н \approx 10$ пФ; K – отсекающий высоковольтный коммутатор генератора ГИН-1,2) [9, 18]

Для измерения с погрешностью не более 5 % на объектах промышленной электроэнергетики аperiodических грозовых и коммутационных импульсов напряжения амплитудой до $\pm 2,5$ МВ в отделе №4 института был создан сверхвысоковольтный омический делитель напряжения типа ОДН-2,5 [19, 20]. Основные технические характеристики данного делителя импульсного напряжения приведены ниже в табл. 4 [20].

Таблица 4
Основные технические характеристики сверхвысоковольтного омического делителя напряжения ОДН-2,5

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
1	Максимальный уровень измеряемого напряжения U_m , кВ	± 2500
2	Активное сопротивление высоковольтного плеча делителя R_B , кОм	107,3
3	Активное сопротивление низковольтного плеча делителя R_H , Ом	4
4	Коэффициент деления, K_{DR}	$26,82 \cdot 10^3$
5	Высота (длина), м	12,6
6	Масса, кг	350

Общий вид сверхвысоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-2,5, функционирующего

в составе уникального генератора коммутационных импульсов напряжения (ГКИН) на $\pm 2,5$ МВ, показан на рис. 14. Высоковольтное плечо делителя типа ОДН-2,5 выполнено из девяти последовательно соединенных R- секций, размещенных на и вне стеклопластиковой трубы марки ТСЭФ наружным диаметром 120 мм с толщиной стенки 10 мм. Каждая R- секция содержит 20 шт. последовательно-параллельно соединенных высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-10-2,4 кОм, собранных на двух стеклопластиковых пластинах длиной 1400 мм и толщиной 5 мм. В результате сопротивление каждой секции высоковольтного плеча делителя составляет около 12 кОм, а его полное сопротивление – $R_B \approx 107,3$ кОм [20].

Низковольтное плечо делителя типа ОДН-2,5 выполнено из малогабаритных керамических резисторов типа ТВО-2-2 Ом с общим активным сопротивлением $R_H=4$ Ом. В этой связи расчетный коэффициент деления K_{DR} для рассматриваемого делителя напряжения типа ОДН-2,5 будет примерно равным $K_{DR}=R_B/R_H=26,82 \cdot 10^3$. При согласованном режиме измерения импульсного напряжения на нагрузке коэффициент деления для делителя типа ОДН-2,5 будет удваиваться и принимать численное значение около $53,65 \cdot 10^3$. Экспериментальная оценка времени реакции T_R омического делителя типа ОДН-2,5 на воздействие прямоугольного импульса напряжения [21] показала, что для этого типа делителя $T_R \approx 170$ нс [19]. В этой связи делитель напряжения типа ОДН-2,5 можно использовать для измерения импульсов напряжения амплитудой $U_m \leq \pm 2,5$ МВ, изменяющихся в микро- и миллисекундном временных диапазонах. Сравнение метрологических характеристик сверхвысоковольтного омического делителя типа ОДН-2,5 с характеристиками известных измерителей высокого и сверхвысокого напряжения [22] указывает на то, что отечественный делитель напряжения типа ОДН-2,5 соответствует современным требованиям и разработкам в области высоковольтной измерительной техники.



Рис. 14. Общий вид сверхвысоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-2,5 на номинальное напряжение $\pm 2,5$ МВ, подсоединенного в разрядной цепи ГКИН к двухэлектродной системе «игла-плоскость» с длиной воздушного промежутка 3 м (верхний стальной стержень-электрод этой электроразрядной системы размещен по центру ее нижнего плоского электрода, выполненного из тонкой оцинкованной стали с размером в плане 5 м \times 5 м) [23]

На рис. 15 приведена осциллограмма импульса сверхвысокого напряжения микросекундной длительности, полученная с помощью омического делителя напряжения типа ОДН-2,5 на длинном воздушном промежутке величиной 3 м при его электрическом пробое в системе «стержень-стержень» [20]. Из осциллограммы рис. 15 видно, что напряжение среза U_C в нашем случае равняется примерно $U_C \approx 25 \text{ В} \times 53,65 \cdot 10^3 \approx 1341,3 \text{ кВ}$. При этом предразрядное время T_C для указанного изоляционного воздушного промежутка составляет около $T_C \approx 5 \times 2,5 \cdot 10^{-6} \approx 12,5 \text{ мкс}$, а длительность среза T_{DC} микросекундной волны напряжения численно не превышает значения 5,47 мкс.

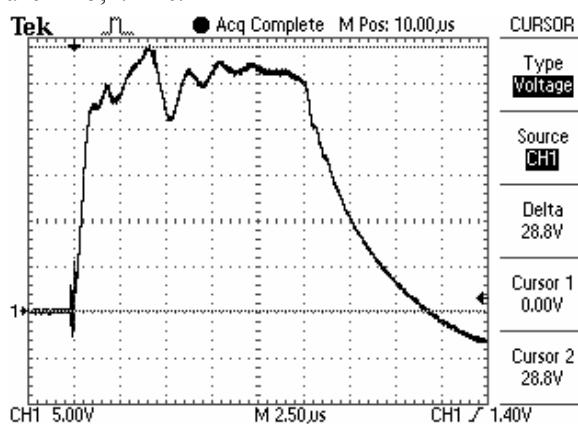


Рис. 15. Осциллограмма импульса сверхвысокого напряжения положительной полярности на воздушном промежутке длиной 3 м в системе «стержень-стержень», срезанного на его нарастающей части и зарегистрированного с помощью омического делителя напряжения ОДН-2,5 (напряжение среза $U_C \approx 1341,3 \text{ кВ}$; предразрядное время $T_C \approx 12,5 \text{ мкс}$; длительность среза $T_{DC} \approx 5,47 \text{ мкс}$; масштаб по вертикали – 268 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 2,5 мкс/клетка) [20]

2. Метрологическое обеспечение испытаний технических объектов на коммутационную стойкость. Для проведения натурных испытаний объектов силовой энергетики на коммутационную стойкость в 2012 г. в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» на экспериментальном полигоне института (п. Андреевка, Харьковской обл.) был создан уникальный ГКИН на номинальное напряжение до $\pm 2 \text{ МВ}$ [23]. Данный ГКИН, размещенный на открытом воздухе, позволяет в полевых условиях на крупногабаритной испытываемой электрической нагрузке надежно формировать в соответствии с требованиями [5] стандартный аperiodический коммутационный импульс напряжения временной формы 205 мкс/1900 мкс обеих полярностей.

Для измерения АВП формируемых в схеме генератора ГКИН импульсов напряжения может быть использован описанный выше сверхвысоковольтный омический делитель напряжения типа ОДН-2,5 [20]. Данные рис. 14 как раз наглядно иллюстрируют практическое использование сверхвысоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-2,5 при метрологическом обеспечении испытаний электрической прочности длинных воздушных промежутков электроэнергетических устройств на коммутационную стойкость. На рис. 16 изображена осциллограмма полного стандартного коммутационного импульса напряжения временной формы 205 мкс/1900 мкс положительной полярности, полученного в разрядной цепи генератора ГКИН в полевых условиях на откры-

том воздухе с использованием омического делителя напряжения типа ОДН-2,5 [23]. Из осциллограммы рис. 16 следует, что амплитуда U_{mk} коммутационной волны напряжения в этом случае составляет примерно $U_{mk} \approx 9 \text{ В} \times 53,65 \cdot 10^3 \approx 483 \text{ кВ}$. Для формируемого на длинном воздушном промежутке коммутационного импульса напряжения время подъема T_{II} достигает численного значения около $T_{II} \approx 205 \text{ мкс}$. При этом длительность T_P коммутационного импульса напряжения на уровне $0,5 U_{mk}$ равняется примерно 1900 мкс.

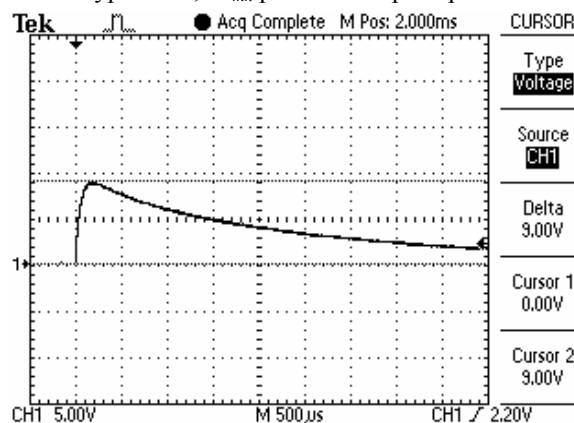


Рис. 16. Осциллограмма полного стандартного аperiodического коммутационного импульса напряжения положительной полярности, сформированного в разрядной цепи сверхвысоковольтного генератора ГКИН на двухэлектродной системе «игла-плоскость» с длиной воздушного промежутка 3 м и зарегистрированного с помощью омического делителя напряжения ОДН-2,5 ($U_{mk} \approx 483 \text{ кВ}$; время подъема импульса напряжения – $T_{II} \approx 205 \text{ мкс}$; длительность импульса напряжения – $T_P \approx 1900 \text{ мкс}$; масштаб по вертикали – 268 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 500 мкс/клетка) [23]

Выводы.

1. Анализ современного состояния в Украине метрологического обеспечения натурных испытаний объектов промышленной энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость и коммутационную стойкость показывает, что НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в настоящее время располагает не только воспроизводящими в указанной области высоковольтной импульсной техники необходимые по требованиям отечественных и зарубежных нормативных документов испытательные импульсы тока и напряжения мощными высоковольтными электроустановками, размещенными на открытом воздухе и в отапливаемых специальных лабораторных помещениях, но и соответствующими измерительными средствами, прошедшими государственную метрологическую поверку (калибровку).

2. В состав данных высоковольтных измерительных средств, используемых в практике натурных испытаний при проверке стойкости объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники к воздействию на их электроаппаратуру, узлы и составные элементы импульсов тока (напряжения) грозовых разрядов и коммутационных импульсов напряжения, входят следующие нестандартизованные приборы собственного изготовления: высоковольтные сильноточные шунты типа ШК-300М1 и ШК-300М2, предназначенные для измерения микро- и миллисекундных импульсов тока амплитудой до $\pm 220 \text{ кА}$ с интегралом их действия до $15 \cdot 10^6 \text{ Дж/Ом}$; емкостные (типа ЕДН-100 и ЕДН-1,2) и омические (типа ОДН-1,2 и ОДН-2,5) делители импульсного напряжения

микро- и миллисекундной длительности, способные как измерять с помощью метрологически поверенных ЦЗО, так и формировать на испытываемой той или иной электрической нагрузке с емкостной характеристикой стандартные (нестандартные) грозовые и коммутационные импульсы напряжения амплитудой до ± 2 МВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
2. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
3. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
4. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2018. – no.4. – pp. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.08.
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 1516.2-97. «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции». – Минск: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects // *Instruments and Experimental Technique*. – 2008. – no.3. – pp. 401-405. doi: 10.1134/S0020441208030123.
7. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы». – М.: Стандартиформ, 2011. – 46 с.
8. ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением. – М.: Госстандарт СССР, 1982. – 32 с.
9. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Харьков: Точка, 2014. – 400 с.
10. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. The coaxial shunt for measurement of current pulses of artificial lightning with the amplitude up to ± 220 kA // *Instruments and Experimental Technique*. – 2018. – vol.61. – no.4. – pp. 501-505. doi: 10.1134/S0020441218030156.
11. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. A coaxial disk shunt for measurement in the high-current circuit of high-voltage generator of storm discharges of pulses of current of artificial lightning with the integral of action up to $15 \cdot 10^6$ J/Ohm // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – no.5. – pp. 45-50. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.07.
12. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Пер. с англ. Ф.А. Николаева, Ю.П. Свириденко. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
13. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – no.1. – pp. 31-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.
14. Baranov M.I., Rudakov S.V. Approximate calculation of basic characteristics of plasma at the air electric explosion of metal conductor // *Electrical engineering & electromechanics*, 2017. – no.6. – pp. 60-64. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.09.
15. Баранов М.И., Зиньковский В.М., Зябко Ю.П., Игнатенко Н.Н., Лысенко В.О. Разработка и создание передвижного емкостного делителя импульсного напряжения амплитудой до ± 100 кВ // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2011. – №49. – С. 3-10.
16. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябко Ю.П. Комплекс высоковольтного электрофизического оборудования для испытания средств молниезащиты технических объектов грозовыми

и коммутационными импульсами напряжения микро- и миллисекундной длительности амплитудой до ± 1 МВ // *Електро-техніка і електромеханіка*. – 2006. – №4. – С. 60-65.

17. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зиньковский В.М., Зябко Ю.П., Игнатенко Н.Н. Омический делитель напряжения для измерения испытательных грозовых и коммутационных импульсов напряжения амплитудой до ± 1 МВ // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2007. – №20. – С. 20-30.
18. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябко Ю.П., Мельников П.Н. Комплекс электрофизического оборудования для генерирования микро- и миллисекундных импульсов напряжения до 1,2 МВ и тока до 200 кА // *Технічна електродинаміка*. – 2003. – №5. – С. 55-59.
19. Баранов М.И., Бочаров В.А., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2003. – №2. – С. 75-80.
20. Баранов М.И., Колиушко Г.М. Экспериментальная оценка электрической прочности длинных воздушных промежутков в электродной системе «стержень-стержень» для микросекундных импульсов напряжения // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2011. – №49. – С. 11-20.
21. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / Пер. с нем. – М.: Энергия, 1973. – 233 с.
22. Гуров С.А., Владимиров Г.А. Универсальные измерительные комплексы на напряжения до 4 МВ // *Електротехніка*. – 1978. – №11. – С. 51-53.
23. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. A switching aperiodic superhigh-voltage pulse generator for testing the electric strength of insulation of technical objects // *Instruments and Experimental Technique*. – 2013. – vol.56. – no.6. – pp. 653-658. doi: 10.1134/S0020441213050126.

REFERENCES

1. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
2. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
3. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
4. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.4, pp. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.08.
5. GOST 1516.2-97. *Elektrooborudovanie i elektroustanovki peremennogo toka na napriazhenie 3 kV i vyshe. Obshchie metody ispytaniy elektricheskoi prochnosti izolatsii* [GOST 1516.2-97. Electrical equipment and electrical options of alternating current voltage 3 kV and above. Common test methods for dielectric strength]. Minsk, Publishing house of standards, 1998. 31 p. (Rus).
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/S0020441208030123.
7. GOST R MEK 62305-1-2010. *Menedzhment riska. Zashhita ot molnii. Chast' 1: Obshhie principy* [GOST R IEC 62305-1-2010. Risk management. Protection from lightning. Part 1: General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 46 p. (Rus).
8. GOST 17512-82. *Elektrooborudovanie i elektroustanovki na napryazhenie 3 kV i vyshe. Metody izmereniya pri ispytaniyah vysokim napryazheniem* [GOST 17512-82. Electrical equipment and electric options on voltage 3 kV and higher. Measuring methods at tests by high voltage]. Moscow, State standard of the USSR Publ., 1982. 32 p. (Rus).
9. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 3-h tomah. Tom 3: Teorija i praktika electrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 3-th vols. Vol.3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv,

Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).

10. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. The coaxial shunt for measurement of current pulses of artificial lightning with the amplitude up to ± 220 kA. *Instruments and Experimental Technique*, 2018, vol.61, no.4, pp. 501-505. doi: 10.1134/S0020441218030156

11. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. A coaxial disk shunt for measurement in the high-current circuit of high-voltage generator of storm discharges of pulses of current of artificial lightning with the integral of action up to $15 \cdot 10^6$ J/Ohm. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 45-50. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.07.

12. Knopfel' G. *Sverkhshil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).

13. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.1, pp. 31-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.

14. Baranov M.I., Rudakov S.V. Approximate calculation of basic characteristics of plasma at the air electric explosion of metal conductor. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.6, pp. 60-64. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.09.

15. Baranov M.I., Zin'kovskiy V.M., Zybko Yu.P., Ignatenko N.N., Lysenko V.O. Development and creation of movable capacity divider of impulsive voltage amplitude to ± 100 kV. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2011, no.49, pp. 3-10. (Rus).

16. Baranov M.I., Bocharov V.A., Zybko Yu.P. Complex high-voltage electrophysical equipment for testing lightning protection of technical objects via storm and switching micro and millisecond voltage impulses with up to 1 MV amplitude. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.4, pp. 60-65. (Rus).

17. Baranov M.I., Bocharov V.A., Zin'kovskiy V.M., Zybko Yu.P., Ignatenko N.N. Ohmic divider of voltage for measuring of proof-of-concept storm and interconnect impulses of voltage amplitude to ± 1 MV. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2007, no.20, pp. 20-30. (Rus).

18. Baranov M.I., Bocharov V.A., Zybko Yu.P., Mel'nikov P.N. Complex of electrophysics equipment for generating of micro- and millisecond impulses of voltage to 1,2 MV and current to 200 kA. *Technical electrodynamics*, 2003, no.5, pp. 55-59. (Rus).

19. Baranov M.I., Bocharov V.A., Ignatenko N.N., Kolobovskiy A.K. Powerful generators of impulsive voltages and currents of maximum parameters for testing of power electroenergy equipment. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2003, no.2, pp. 75-80. (Rus).

20. Baranov M.I., Koliushko G.M. Experimental estimation of electric durability of long air intervals in the electrode system «bar-bar» for the microsecond impulses of voltage. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2011, no.49, pp.11-20. (Rus).

21. Shvab A. *Izmereniya na vysokom napryazhenii* [Measuring on high voltage. Trans. with German]. Moscow, Energy Publ., 1973. 233 p. (Rus).

22. Gurov S.A., Vladimirov G.A. Universal measuring complexes on voltages to 4 MV. *Electrical Engineering*, 1978, no.11, pp. 51-53. (Rus).

23. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. A switching aperiodic superhigh-voltage pulse generator for testing the electric strength of insulation of technical objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2013, vol.56, no.6, pp. 653-658. doi: 10.1134/S0020441213050126.

Поступила (received) 19.07.2018

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., гл.н.с.,
Буряковский Сергей Геннадиевич¹, д.т.н., директор,
Рудаков Сергей Валерьевич², к.т.н., доц.,
¹ НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,

тел/phone +38 057 7076841,

e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua, sergbyrg@i.ua

² Национальный университет гражданской защиты Украины,
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,

тел/phone +38 057 7073438,

e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov¹, S.G. Buriakovskiy¹, S.V. Rudakov²

¹ Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

² National University of Civil Protection of Ukraine,
94, Chernyshevska Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage.

Purpose. Presentation and analysis of the modern state of the metrology support in Ukraine of model tests of equipment of objects of energy on resistibility to the action of pulsed current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage, and also objects of aviation and space-rocket engineering on resistibility to lightning. **Methodology.** Electrophysics bases of engineering of high-voltage and large pulsed currents, theoretical bases of the electrical engineering, technique of the strong electric and magnetic fields, and also measuring technique. **Scientific methods of analysis of scientific and technical information. Results.** Information is resulted, touching the modern consisting of Ukraine of providing high-voltage measuring facilities conducted on requirements of the normative documents of the USA of SAE ARP 5412:2013, SAE ARP 5416:2013, International Standard of IEC 62305-1:2010 and Standard GOST 1516.2-97 model tests of equipment of objects of energy on resistibility to lightning and commutation resistibility, and also objects of aviation and space-rocket engineering on resistibility to lightning. It is marked that similar measuring facilities are not made by domestic industry. It is indicated that R&DPCI «Molniya» of the NTU «KhPI» disposes the proper measuring facilities of the own making, passing a state metrology check (calibration). Basic technical descriptions are described developed and created at this Institute: high-voltage high-current shunts of type of SC-300M1 and SC-300M2, intended for measuring of micro- and millisecond pulses of current amplitude to ± 220 kA with the integral of their action to $15 \cdot 10^6$ J/Ohm; capacitive (type of CDV-100 and CDV-1,2) and ohmic (type of ODV-1,2 and ODV-2,5) dividers of pulsed voltage of micro- and millisecond duration, capable not only to measure but also form on the tested electric loading standard (non-standard) storm and commutation pulses of voltage amplitude to ± 2 MV. **Originality.** First in the generalized kind possibilities are developed and created by the domestic scientific and technical workers of high-voltage high-current measuring facilities, intended for the aims of the metrology providing of model tests in obedience to the requirements of domestic and foreign normative documents of equipment of objects of energy on resistibility to lightning and commutation resistibility, and also objects of aviation and space-rocket engineering on resistibility to lightning. **Practical value.** Application in practice of model tests on powerful high-voltage pulsed current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage of electrical equipment and component elements of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to lightning and commutation resistibility of the described special high-voltage measuring facilities will be instrumental in the decision of global in the world problem of protection from lightning of ground and air-based technical objects and to the increase of their strength security. References 23, tables 4, figures 16.

Key words: high-voltage generators of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage, objects of energy, aviation and space-rocket engineering, measuring facilities for the model tests of technical objects on resistibility to the action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage.

CHARACTERISTICS OF SPECIALIZED SINGLE-PHASE HIGH VOLTAGE DOUBLER RECTIFIER

Introduction. To obtain a high voltage direct current, voltage multipliers with a number of cascades of three or more are widely used. At the same time, for voltage levels of 100...200 kV there are several advantages of using a specialized single-phase high voltage doubler rectifier. **Problem.** The main difficulty is that at the moment mathematical modeling has not been worked out for describing modes that use the built-in R, C -filter, as well as a nonlinear load in the form of Zener diodes. **Goal.** Generalization of the results of the authors' previous publications on the development of an analytical method for calculating the modes of a typical high-voltage direct current installation based on a specialized single-phase voltage doubler rectifier. **Methodology.** Compilation of a system of algebraic linear and nonlinear equations that describe the current and voltage modes in the elements of a typical high-voltage direct current installation with a nonlinear load. **Results.** It is shown that with the use of linearization of the current-voltage characteristics of Zener diodes used in the load circuits of a typical high-voltage direct current installation, an analytical solution for the voltages and currents in its elements can be obtained. **Originality.** The theoretical basis of the complex solution of the system of equations for the currents, voltages and power of the elements of a typical high-voltage direct current installation with the account of nonlinear pulsations is formulated for the first time. **Practical value.** The obtained theoretical results can be used for calculations, design, optimization of the modes for a wide range of high-voltage direct current installations of technical, technological, and measuring purposes in the range up to 100...200 kV. References 16, tables 2, figures 3.

Key words: voltage doubler rectifier, high-voltage Zener diode, current-voltage characteristic.

Цель. Обобщение результатов предыдущих публикаций авторского коллектива по разработке аналитического метода расчёта режимов типовой установки высокого напряжения постоянного тока на основе специализированного однофазного выпрямителя с удвоением напряжения. **Методика.** Составление системы алгебраических линейных и нелинейных уравнений, описывающих режимы тока и напряжения в элементах типовой схемы установки высокого напряжения постоянного тока с нелинейной нагрузкой. **Результаты.** Показано, что с применением линейзации вольт-амперных характеристик стабилитронов, используемых в цепях нагрузки типовой установки высокого напряжения постоянного тока, может быть получено аналитическое решение для напряжений и токов в её элементах. **Научная новизна.** Впервые сформулирован теоретический базис комплексного решения системы уравнений для токов, напряжений и мощности элементов типовой установки высокого напряжения постоянного тока с учётом нелинейных пульсаций. **Практическая значимость.** Полученные теоретические результаты могут быть использованы для расчётов, проектирования, оптимизации режимов широкого спектра установок высокого напряжения постоянного тока технического, технологического, а также измерительного назначения в диапазоне до 100...200 кВ. Библ. 16, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: выпрямитель с удвоением напряжения, высоковольтный стабилитрон, вольт-амперная характеристика.

Introduction. The variety of high voltage applications for steady-state modes of technological equipment (electrostatic precipitators of coal-fired power plants, electro-coloring and coating sputtering devices, electric separators) necessitates the improvement of their power supplies to a level of 100...200 kV. In connection with this, recently interest in various variants of the improvement of the classical Cockcroft-Walton direct current voltage generator [3] with a number of stages of three or more [1, 2] has appeared. At the same time, since high-voltage diodes [4] are of high quality, in order to obtain the above voltage level, it is more efficient to use the Cockcroft-Walton generator with only doubling the rectified voltage, and to reduce output voltage ripple – to supplement it with the «built-in» R, C – filter [5].

It should be noted that to date no rigorous mathematical model of the Cockcroft-Walton generator has been created. The available publications on this topic give different results on the magnitude of voltage ripples, and there are also no analytical expressions for the shape of pulsing voltage, etc.

In this connection, a new development of the authors' team [6-8] on the creation of elements of the theory of voltages and currents of the Cockcroft-Walton generator with voltage doubling, together with the integrated R, C – filter,

and, in addition, the possibility of attaching to its load nonlinear elements such as Zener diodes.

The goal of the paper is to generalize the results of previous publications of the authors' group, to formulate and analyze the final analytical expressions for both voltages and currents in the rectifier circuit with voltage doubling in Fig. 1, and for the powers of the elements of the Cockcroft-Walton generator with voltage doubling and its integrated R, C – filter, taking into account the nonlinear pulsation modes. To reduce the terminology, we will call such a generator a specialized single-phase high voltage doubler rectifier.

The subject of the research is a specialized high-voltage single-phase rectifier with voltage doubling, its generalized circuit is shown in Fig. 1.

In Fig. 1: VT – high-voltage step-up transformer; VD_1, VD_2 – high-voltage diodes; C_1, C_2, C_3 – capacitors; R_f, R_{LV}, r – resistors. The branch of n Zener diodes ZD_1, \dots, ZD_n , resistor r and voltmeter V forms the «built-in» high-precision measuring group of the load voltage U_{LV} . In this case, the voltage source in the circuit diagram in Fig. 1 is of interest for both technological applications and measuring equipment [9, 10]. The peculiarity of this voltage source is that by changing the parameters of the elements it is possible to adjust the amplitude and shape

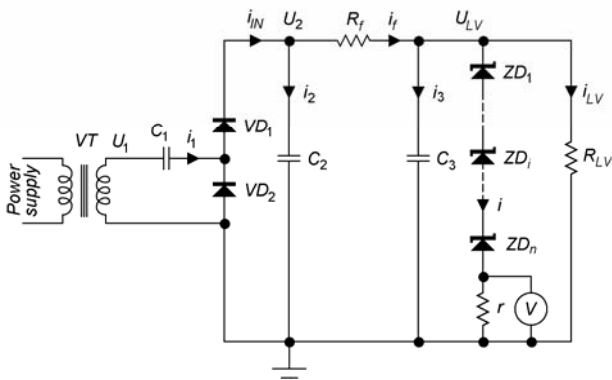


Fig. 1. Functional diagram of rectifier with voltage doubling [5]

of the output voltage ripple U_{LV} in a wide range. The problems of the synthesis of circuits with capacitive energy storage devices, including those using nonlinear electrical loads, are considered in modern publications [11-13]. However, the features of the high-voltage source in Fig. 1 in the well-known publications of other authors have not been studied. The calculated relationships for the voltages and currents of the circuit in Fig. 1 were first obtained in [6-8].

The initial prerequisites for the research are based on a number of conditions:

- a typical current-voltage characteristic of a Zener diode has the form shown in Fig. 2, where u_0 , I_0 denote the selected point of its operating mode;
- a differential resistance of a Zener diode $r_d = du_{ZD}/di_{ZD}$ in its operating domain is far less than the impedance u_0/I_0 (number 1 denotes the linearized current-voltage characteristic of a Zener diode);
- a capacitance current $C_{ZD} \frac{du_{ZD}}{dt}$ of a Zener diode is far less than its through-current I_0 (here C_{ZD} is the inter-electrode capacitance of a Zener diode);
- placement of a Zener diode in a metal casing (Fig. 3) completely shields its internal active element from the influence of external electric fields [5].

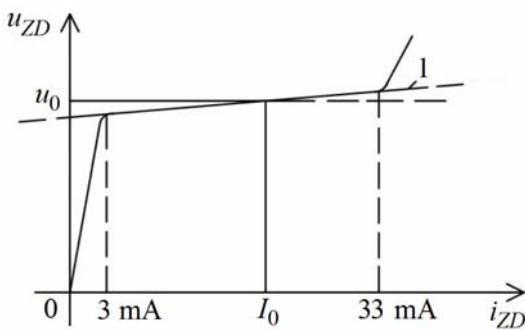


Fig. 2. Current-voltage characteristic of the Zener diode D818D

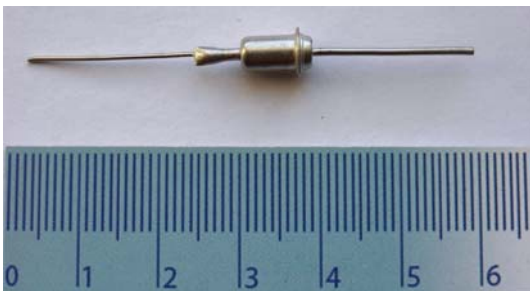


Fig. 3. Photograph of the Zener diode D818D

When these conditions are fulfilled, a series connection of the same type of Zener diodes in the steady state is characterized by the flow of the same current I_0 through their circuit with the voltage operating point

$$U_0 = u_{01} + u_{02} + \dots + u_{0i} + \dots + u_{0n},$$

as well as the total differential resistance

$$R_d = r_{d1} + r_{d2} + \dots + r_{di} + \dots + r_{dn},$$

that corresponds to the conclusion of [4] on the admissibility of a serial connection of any number of Zener diodes. The typical «high-voltage» design of insulation of a series of similar Zener diodes eliminates the need to take into account the corona and other phenomena of distributed currents [9].

Derivation of the initial expressions. Then for the instantaneous load voltage $u_{LV}(t)$, one can write:

$$u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + (i(t) - I_0)(R_d + r), \quad (1)$$

where: $i(t)$ – instantaneous current through a Zener diode and resistor r branch. From here one can get:

$$i(t) = \frac{u_{LV}(t) - U_0 - I_0 r}{R_d + r} + I_0. \quad (2)$$

The expressions (1) and (2) are valid within the stabilized domain of the current-voltage characteristic of Zener diodes (Fig. 2) and, therefore, are applicable up to a current ripple level of ~50 % (when I_0 is selected in the middle part of this domain). The peculiarity of the expressions (1) and (2) is also that they can provide (with an appropriate selection of the parameters U_0 , R_d) any variants of a series connection of Zener diodes and a resistor r , up to the limit: «only the Zener diode» load or «only resistive» load.

Let us write

$$u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u(t),$$

where $\Delta u(t)$ – load voltage ripple as a function of time.

Wherein

$$\int_0^T \Delta u(t) dt = 0,$$

where $T = 1/f$ – voltage period of sinusoidal voltage $u_1(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$, $\omega = 2\pi f$ – angular frequency, f – voltage frequency.

Let us write $i_3 = C_3 \cdot du_{LV}(t)/dt$ (taking into account the losses in the capacitors of the circuit in Fig. 1 slightly refines the results obtained [6]) and $i_{LV} = u_{LV}(t)/R_{LV}$.

Then the current flowing through the resistor R_f is:

$$i_f = I_0 + \frac{\Delta u(t)}{R_d + r} + \frac{U_0 + I_0 r + \Delta u(t)}{R_{LV}} + C_3 \frac{du_{LV}(t)}{dt},$$

and voltage is:

$$u_{C2}(t) = u_{LV}(t) + i_f R_f.$$

In its turn, $i_2 = C_2 \cdot du_{C2}(t)/dt$ and the total current at the input of the right-hand side of the circuit is

$$\begin{aligned} i_{IN} &= i_f + i_2 = \\ &= I_0 + \frac{u_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + \\ &+ \frac{d\Delta u(t)}{dt} \left(C_3 + C_2 \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right) \right) + \\ &+ C_2 C_3 R_f \frac{d^2 \Delta u(t)}{dt^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Since the process occurs cyclically, let us assume that at time instant t_1 , the diode VD_1 «opens», and the current $i_1=i_{IN}$ flows (the resistance of the diode VD_1 in the open state is neglected). At time instant $t_2>t_1$, the diode VD_1 «closes» (the resistance of the diode in the closed state is assumed to be infinitely large). In the time interval $t_2 \leq t \leq T+t_1$, the current $i_{IN}=0$. Proceeding from this for a given period of time, from (3) one can obtain an equation for a function of $\Delta u_1(t)$ in the form:

$$\frac{d^2 \Delta u_1(t)}{dt^2} + a_1 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt} + a_2 \Delta u_1(t) = I_0 + \frac{1}{R_{LV}}(U_0 + I_0 r) = -\frac{1}{C_2 C_3 R_f}, \quad (4)$$

where

$$a_1 = \frac{C_3 + C_2 \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right)}{C_2 C_3 R_f},$$

$$a_2 = \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r}.$$

A study of the roots p_1, p_2 of the characteristic equation $p^2 + a_1 p + a_2 = 0$ shows that its discriminant $D > 0$. Thus, one can find the solution for $\Delta u_1(t)$ in the form:

$$\Delta u_1(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \Delta u_{1s}, \quad (5)$$

where Δu_{1s} – steady-state voltage.

For the industrial power supply frequencies of the circuit in Fig. 1, one can ignore the inductance of its elements. Therefore, in the open state of VD_1 (during the time interval $t_1 \leq t \leq t_2$) one can obtain [6]:

$$i_{IN}(t) = i_1(t),$$

$$u_{C2} = U_m \sin(\omega t) + U_m - \frac{1}{C_1} \int_{t_1}^t i_1(t) dt.$$

After differentiating this expression, one can get:

$$\frac{du_{C2}(t)}{dt} = \omega U_m \cos(\omega t) - \frac{1}{C_1} i_1(t)$$

and, consequently:

$$i_1(t) = C_1 \omega U_m \cos(\omega t) - C_1 \frac{du_{C2}(t)}{dt}. \quad (6)$$

Using the expression $u_{C2}(t) = u_{LV}(t) + i_f(t) \cdot R_f$ and performing its differentiation, and also substituting (6) in (3), one obtain the equation for the function $\Delta u_2(t)$ during the time period $t_1 \leq t \leq t_2$:

$$\frac{d^2 \Delta u_2(t)}{dt^2} + b_1 \frac{d\Delta u_2(t)}{dt} + b_2 \Delta u_2(t) = \frac{C_1 \omega U_m \cos(\omega t)}{R_f C_3 (C_1 + C_2)} - \frac{I_0 + \frac{1}{R_{LV}}(U_0 + I_0 r)}{R_f C_3 (C_1 + C_2)}, \quad (7)$$

where

$$b_1 = \frac{C_3 + (C_1 + C_2) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right)}{R_f C_3 (C_1 + C_2)},$$

$$b_2 = \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r}.$$

The discriminant of the characteristic equation in this case is also greater than zero, and the solution for $\Delta u_2(t)$ is found in the form:

$$\Delta u_2(t) = A_3 \sin(\omega t + \psi) + A_4 e^{p_3 t} + A_5 e^{p_4 t} + \Delta u_{2s}, \quad (8)$$

where Δu_{2s} – steady-state voltage, p_3, p_4 – roots of the characteristic equation $p^2 + b_1 p + b_2 = 0$. Values of A_3 and ψ are given by following expressions:

$$A_3 = \frac{C_1 \omega U_m}{R_f C_3 (C_1 + C_2) \sqrt{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}},$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right).$$

Comparing (5) and (8), one can find:

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = -\frac{I_0 + \frac{1}{R_{LV}}(U_0 + I_0 r)}{\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r}},$$

where Δu_s – continuous component of the ripple voltage.

Using the invariance of u_{C2} and u_{C3} at the time instants t_1, t_2 , as well as the determination of t_1 from the condition $U_m(1 + \sin(\omega t_1)) = u_{C2}(t_1)$, and the time instant t_2 from the condition $i_1(t_2) = 0$, and also the expression

$$\int_{t_2}^{T+t_1} \Delta u_1(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \Delta u_2(t) dt = 0,$$

one can get a system of seven algebraic equations (9) – (15) with seven unknowns: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, t_1, t_2$

$$\omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} = p_1 A_1 + p_2 A_2; \quad (9)$$

$$\omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5 = p_1 A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + p_2 A_2 e^{p_2(T-\Delta t)}; \quad (10)$$

$$A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + A_2 e^{p_2(T-\Delta t)}; \quad (11)$$

$$A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + A_4 e^{p_3 \Delta t} + A_5 e^{p_4 \Delta t} = A_1 + A_2; \quad (12)$$

$$\frac{A_3}{\omega} (\cos(\psi) - \cos(\omega \Delta t + \psi)) = -\Delta u_s T - \frac{A_1}{p_1} (e^{p_1(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} (e^{p_2(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_4}{p_3} (e^{p_3 \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} (e^{p_4 \Delta t} - 1); \quad (13)$$

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{F_1}{U_m} - 1\right); \quad (14)$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \arccos\left(\frac{F_2}{\omega U_m}\right). \quad (15)$$

In (14) F_1 is given by the expression:

$$F_1 = I_0 R_f + (U_0 + I_0 r) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}}\right) + (\Delta u_s + A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right) + C_3 R_f (\omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5).$$

In its turn, in (15) F_2 is given by the expression:

$$F_2 = C_3 R_f \left(-\omega^2 A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + p_3^2 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4^2 A_5 e^{p_4 \Delta t}\right) + \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right) (\omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t}).$$

It should be noted that $\Delta t = t_2 - t_1$, while the relation between A_3 and U_m is defined above.

Equations (9) – (13) are linear with respect to $A_1, \dots, A_j, \dots, A_5$, and therefore the system of equations (9) – (15) can be reduced to three equations with three unknowns t_1, t_2, A_j . Our experience in calculating (9) – (15) confirms the possibility of obtaining in each particular case a unique solution of the system in a set of real numbers.

Development of theory. The initial expressions (1) – (15) obtained above are derived from the publications of the authors [6-8] and are necessary for the further presentation of the materials in this article.

The advantage of the obtained analytical solution of this problem implies its logical conclusion in the derivation of expressions for the power of the elements of the circuit in Fig. 1 taking into account the voltage and current ripple in these elements (without the assumption of a limitation of their smallness).

The power losses in the R_{LV} load can be found as follows:

$$P_{LV} = f \int_{t_2}^{T+t_1} \frac{[u_{LV}(t)]^2}{R_{LV}} dt + f \int_{t_1}^{t_2} \frac{[u_{LV}(t)]^2}{R_{LV}} dt, \quad (16)$$

where $u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u_1(t)$ for time interval $t_2 \leq t \leq T+t_1$, and $u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u_2(t)$ for time interval $t_1 \leq t \leq t_2$.

Then let us transform (16) to the following form:

$$\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} = \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)} = \int_{t_2}^{T+t_1} [V_0 + \Delta u_1(t)]^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} [V_0 + \Delta u_2(t)]^2 dt, \quad (17)$$

where $V_0 = U_0 + I_0 r$.

Let us rewrite formula (17), integrating each component and assuming $V_0^{(1)} = V_0 + \Delta u_s$, then one can obtain the following expressions, that allow computing the power losses of P_{LV} taking into account the voltage and current ripple on the load R_{LV} :

$$\left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} = \left(V_0^{(1)}\right)^2 (T + t_1 - t_2) + \frac{A_1^2}{2 p_1} \times \left[e^{2 p_1 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \frac{A_2^2}{2 p_2} \left[e^{2 p_2 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \frac{2 V_0^{(1)} A_1}{p_1} \left[e^{p_1 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \frac{2 V_0^{(1)} A_2}{p_2} \times \left[e^{p_2 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \frac{2 A_1 A_2}{p_1 + p_2} \left[e^{(p_1 + p_2)(T + t_1 - t_2)} - 1 \right]; \quad (18)$$

$$\left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)} = \left(V_0^{(1)}\right)^2 (t_2 - t_1) + A_3^2 \times \left[\frac{t_2 - t_1}{2} + \frac{1}{4 \omega} [\sin(2 \psi) - \sin(2(\omega(t_2 - t_1) + \psi))] \right] + \frac{A_4^2}{2 p_3} \left[e^{2 p_3 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \frac{A_5^2}{2 p_4} \left[e^{2 p_4 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \frac{2 V_0^{(1)} A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \cos(\omega(t_2 - t_1) + \psi)] + \frac{2 V_0^{(1)} A_4}{p_3} \times \left[e^{p_3 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \frac{2 V_0^{(1)} A_5}{p_4} \left[e^{p_4 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \frac{2 A_3 A_4}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3 (t_2 - t_1)} \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2 A_3 A_5}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4 (t_2 - t_1)} \times \left(\frac{p_4}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \frac{p_4}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2 A_4 A_5}{p_3 + p_4} \left[e^{(p_3 + p_4)(t_2 - t_1)} - 1 \right]. \quad (19)$$

The expression for the power losses in the group of elements $ZD_1 \dots ZD_n, r$, taking into account the previous consideration, will look like:

$$P_i = f \int_{t_2}^{T+t_1} \left[V_0 + \Delta u_1(t) \right] \cdot \left[\frac{\Delta u_1(t)}{R_d + r} + I_0 \right] dt + f \int_{t_1}^{t_2} \left[V_0 + \Delta u_2(t) \right] \cdot \left[\frac{\Delta u_2(t)}{R_d + r} + I_0 \right] dt. \quad (20)$$

Next, let us transform expression (20) to the form:

$$\frac{P_i}{f} = \left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)} = \int_{t_2}^{T+t_1} \left[V_0 I_0 + \Delta u_1(t) \left(I_0 + \frac{V_0}{R_d + r} \right) + \frac{(\Delta u_1(t))^2}{R_d + r} \right] dt + \int_{t_1}^{t_2} \left[V_0 I_0 + \Delta u_2(t) \left(I_0 + \frac{V_0}{R_d + r} \right) + \frac{(\Delta u_2(t))^2}{R_d + r} \right] dt. \quad (21)$$

After integrating each component, the following expressions can be obtained, that allow calculating power losses in the group of elements $ZD_1 \dots ZD_n, r$:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} &= V_0 I_0 (T + t_1 - t_2) + \frac{I_0^{(1)} A_1}{p_1} \left[e^{p_1 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \\
 &+ \frac{I_0^{(1)} A_2}{p_2} \left[e^{p_2 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + I_0^{(1)} \Delta u_s (T + t_1 - t_2) + \\
 &+ \frac{V_0^{(2)} A_1^2}{2 p_1} \left[e^{2 p_1 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \frac{V_0^{(2)} A_2^2}{2 p_2} \times \\
 &\times \left[e^{2 p_2 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + V_0^{(2)} (\Delta u_s)^2 (T + t_1 - t_2) + \\
 &+ \frac{2 V_0^{(2)} A_1 A_2}{p_1 + p_2} \left[e^{(p_1 + p_2) (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \frac{2 V_0^{(2)} \Delta u_s A_1}{p_1} \times \\
 &\times \left[e^{p_1 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \frac{2 V_0^{(2)} \Delta u_s A_2}{p_2} \left[e^{p_2 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right]; \\
 \left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)} &= V_0 I_0 (t_2 - t_1) + \frac{I_0^{(1)} A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \\
 &- \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \frac{I_0^{(1)} A_4}{p_3} \left[e^{p_3 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \\
 &+ \frac{I_0^{(1)} A_5}{p_4} \left[e^{p_4 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + I_0^{(1)} \Delta u_s (t_2 - t_1) + V_0^{(2)} A_3^2 \times \\
 &\times \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \frac{1}{4 \omega} [\sin(2\psi) - \sin(2[\omega(t_2 - t_1) + \psi])] \right] + \\
 &+ \frac{V_0^{(2)} A_4^2}{2 p_3} \left[e^{2 p_3 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \frac{V_0^{(2)} A_5^2}{2 p_4} \left[e^{2 p_4 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \\
 &+ V_0^{(2)} (\Delta u_s)^2 (t_2 - t_1) + \frac{2 V_0^{(2)} A_3 A_4}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3 (t_2 - t_1)} \times \right. \\
 &\times \left. \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \right. \\
 &- \left. \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2 V_0^{(2)} A_3 A_5}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4 (t_2 - t_1)} \times \right. \\
 &\times \left. \left(\frac{p_4}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \right. \\
 &- \left. \frac{p_4}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2 V_0^{(2)} \Delta u_s A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \\
 &- \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \frac{2 V_0^{(2)} A_4 A_5}{p_3 + p_4} \left[e^{(p_3 + p_4) (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \\
 &+ \frac{2 V_0^{(2)} \Delta u_s A_4}{p_3} \left[e^{p_3 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \\
 &+ \frac{2 V_0^{(2)} \Delta u_s A_5}{p_4} \left[e^{p_4 (t_2 - t_1)} - 1 \right], \quad (22)
 \end{aligned}$$

where $I_0^{(1)} = I_0 + V_0 / (R_d + r)$, $V_0^{(2)} = 1 / (R_d + r)$.

The power losses in the active resistance of the filter R_f can be determined by the formula:

$$P_f = f \int_{t_2}^{T+t_1} [(i_{f1})^2 R_f] dt + f \int_{t_1}^{t_2} [(i_{f2})^2 R_f] dt, \quad (24)$$

where the values of i_{f1} , i_{f2} have the following form:

$$\begin{aligned}
 i_{f1} &= I_0 + \frac{U_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u_1(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + \\
 &+ C_3 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt}, \\
 i_{f2} &= I_0 + \frac{U_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u_2(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + \\
 &+ C_3 \frac{d\Delta u_2(t)}{dt}.
 \end{aligned}$$

Then let us transform expression (24) to the form:

$$\begin{aligned}
 \frac{P_f}{R_f f} &= \left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(2)} = \\
 &= \int_{t_2}^{T+t_1} \left(I_0^{(2)} + \Delta u_1(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + C_3 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt} \right)^2 dt + \\
 &+ \int_{t_1}^{t_2} \left(I_0^{(2)} + \Delta u_2(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + C_3 \frac{d\Delta u_2(t)}{dt} \right)^2 dt,
 \end{aligned}$$

where $I_0^{(2)} = I_0 + (U_0 + I_0 r) / R_{LV}$.

After integrating each component, one can obtain the following expressions that allow calculating the power losses in the active filter resistance of the installation:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} &= \left(I_0^{(3)}\right)^2 (T + t_1 - t_2) + \frac{X_4^2}{2 p_1} \left[e^{2 p_1 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \\
 &+ \frac{X_5^2}{2 p_2} \left[e^{2 p_2 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \frac{2 I_0^{(3)} X_4}{p_1} \left[e^{p_1 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \\
 &+ \frac{2 I_0^{(3)} X_5}{p_2} \left[e^{p_2 (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \frac{2 X_4 X_5}{p_1 + p_2} \times \\
 &\times \left[e^{(p_1 + p_2) (T + t_1 - t_2)} - 1 \right], \quad (25) \\
 \left(\frac{P_f}{R_f f}\right)^{(2)} &= \left(I_0^{(3)}\right)^2 (t_2 - t_1) + X_1^2 \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \right. \\
 &+ \left. \frac{1}{4 \omega} [\sin(2\psi) - \sin(2[\omega(t_2 - t_1) + \psi])] \right] + (A_3 \omega C_3)^2 \times \\
 &\times \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \frac{1}{4 \omega} [\sin(2[\omega(t_2 - t_1) + \psi]) - \sin(2\psi)] \right] + \\
 &+ \frac{X_2^2}{2 p_3} \left[e^{2 p_3 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \frac{X_3^2}{2 p_4} \left[e^{2 p_4 (t_2 - t_1)} - 1 \right] + \\
 &+ \frac{2 I_0^{(3)} X_1}{\omega} [\cos(\psi) - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \\
 &+ 2 I_0^{(3)} A_3 C_3 [\sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \sin(\psi)] + \frac{2 I_0^{(3)} X_2}{p_3} \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[e^{p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{2I_0^{(3)} X_3}{p_4} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{X_1 A_3 C_3}{2} \times \\
& \quad \times \left[\cos(2\psi) - \cos(2[\omega(t_2-t_1) + \psi]) \right] + \\
& \quad + \frac{2X_1 X_2}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} \times \right. \\
& \quad \times \left. \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2-t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2-t_1) + \psi] \right) - \right. \\
& \quad \left. - \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2X_1 X_3}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} \times \right. \\
& \quad \times \left. \left(\frac{p_4}{\omega} \sin[\omega \cdot (t_2-t_1) + \psi] - \cos[\omega \cdot (t_2-t_1) + \psi] \right) - \right. \\
& \quad \left. \frac{p_4}{\omega} \sin \psi + \cos \psi \right] + \frac{2X_2 A_3 C_3}{\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} \times \right. \\
& \quad \times \left. \left(\frac{p_3}{\omega} \cos[\omega \cdot (t_2-t_1) + \psi] + \sin[\omega \cdot (t_2-t_1) + \psi] \right) - \right. \\
& \quad \left. - \frac{p_3}{\omega} \cos(\psi) - \sin(\psi) \right] + \frac{2X_3 A_3 C_3}{\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} \times \right. \\
& \quad \times \left. \left(\frac{p_4}{\omega} \cos[\omega(t_2-t_1) + \psi] + \sin[\omega(t_2-t_1) + \psi] \right) - \right. \\
& \quad \left. - \frac{p_4}{\omega} \cos(\psi) - \sin(\psi) \right] + \frac{2X_2 X_3}{p_3 + p_4} \times \\
& \quad \times \left[e^{(p_3+p_4)(t_2-t_1)} - 1 \right], \tag{26}
\end{aligned}$$

where

$$I_0^{(3)} = I_0^{(2)} + \Delta u_s \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_1 = A_3 \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_2 = A_4 \left(p_3 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_3 = A_5 \left(p_4 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_4 = A_1 \left(p_1 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_5 = A_2 \left(p_2 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right).$$

Approbation of the obtained theoretical results was performed using the calculations of the parameters of the standard installation DETU 08-04-99, that is used in the State verification scheme for means of measuring the direct current electric voltage in the range 1...180 kV [14].

To the high voltage direct current power supply circuit

shown in Fig. 1 were assigned the following parameters that correspond to the installation of DETU 08-04-99 in the modes of rated voltages V_0 from 1 to 180 kV: C_1 – charging capacitor (0.1 μ F); C_2, C_3 – filter capacitors (0.072 μ F); R_f – filter resistance (1.78 M Ω); ZD_1, \dots, ZD_n are Zener diodes of the D818D type; R_{LV} is the resistance of the resistive voltage divider.

For the D818D Zener diodes, the value of stabilized current $I_0 = 5$ mA was selected for 27 different values of the rated voltages V_0 on the load, according to Table 1. The voltage divider has four values of input rated voltages V_0 : 180 kV; 90 kV; 60 kV; 30 kV for which the current of the divider voltage is $I_{LV} = 2.5$ mA. For the other 23 input voltages of the voltage divider V_0 , its current decreases in proportion to the input voltage.

Table 1

Calculation results for 27 power modes of the DETU 08-04-99 installation

V_0 , kV	U_m , kV	Δ_1 , V	Δ_2 , V	Δ_p , %	$I_0 + I_{LV}$, mA
1	5.97	3.54	-4.08	0.381	5.083
2	6.61	3.81	-4.88	0.217	5.167
3	7.25	4.45	-5.69	0.169	5.250
4	7.89	5.04	-6.49	0.144	5.333
5	8.52	5.57	-7.27	0.128	5.417
6	9.16	6.04	-8.04	0.117	5.500
7	9.80	6.44	-8.81	0.109	5.583
8	10.44	6.78	-9.54	0.102	5.667
9	11.08	7.07	-10.26	0.096	5.750
10	11.72	7.31	-10.97	0.091	5.833
20	18.27	11.41	-20.65	0.080	6.667
30	24.66	13.09	-24.15	0.062	7.500
40	29.27	11.71	-22.07	0.042	6.667
50	35.22	12.46	-23.82	0.036	7.083
60	41.17	13.18	-25.51	0.032	7.500
70	46.09	12.18	-23.86	0.025	6.944
80	51.90	12.63	-24.97	0.023	7.222
90	57.71	13.09	-26.05	0.021	7.500
100	62.04	11.11	-22.32	0.017	6.389
110	67.70	11.39	-22.88	0.016	6.528
120	73.36	11.67	-23.43	0.015	6.667
130	79.02	11.95	-23.97	0.014	6.806
140	84.68	12.22	-24.51	0.013	6.944
150	90.34	12.49	-25.03	0.012	7.083
160	96.00	12.76	-25.55	0.012	7.222
170	101.66	13.02	-26.07	0.012	7.361
180	107.32	13.29	-26.59	0.011	7.500

Calculations were performed to solve the system of equations (9) – (15) for the parameters $r = 10$ k Ω for the modes $V_0 = 1 \dots 10$ kV and $r = 60$ k Ω for the $V_0 = 20 \dots 180$ kV modes. The value of r_d was assumed according to [4] equal to 22 Ω for each Zener diode, and $R_d = nr_d$, where n is the number of Zener diodes corresponding to each mode V_0 . This quantity is determined based on the average value of the D818D stabilization voltage $u_0 = 9$ V.

Based on the calculation results, the maximum positive pulsation values $\Delta u(t) = \Delta_1$ and minimum negative pulsation values $\Delta u(t) = \Delta_2$ were determined, as well as the pulsation amplitude coefficient:

$$\Delta_p = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2V_0} 100, \% \tag{27}$$

The obtained results of calculations are shown in Table 1. Table 1 also shows the value of the total average

load current $I_0 + I_{LV}$ (mA) for each DETU 08-04-99 installation operating mode.

From the data in Table 1 it follows that with increase in load voltage V_0 , the pulsation amplitude coefficient Δ_p decreases accordingly. In the $V_0 = 1$ kV mode, the pulsation amplitude coefficient $\Delta_p = 0.381\%$, and in the $V_0 = 180$ kV mode the pulsation amplitude coefficient is $\Delta_p = 0.011\%$. The above values of ripple in different operating modes of the installation differ by a factor of 35.

Using the values of P_{LV} , P_i , P_f obtained above, one can determine the energy efficiency coefficient of the DETU 08-04-99 installation with nonlinear load:

$$EFF = \frac{P_{LV} + P_i}{P_{LV} + P_i + P_f} 100 = \frac{1}{1 + P_f / (P_{LV} + P_i)} 100, \% \quad (28)$$

Table 2 shows the calculated values of EFF (28) for the DETU 08-04-99 installation for V_0 modes from 1 to 30 kV. For the $V_0 = 180$ kV mode, the EFF value is 93.1%.

The calculated results for the DETU 08-04-99 installation, given in Table 1 and Table 2 are confirmed by the data of installation experimental study.

Table 2

The values of the energy efficiency coefficient of the DETU 08-04-99 installation for the V_0 values from 1 kV to 30 kV

V_0 , kV	P_{LV} , W	P_i , W	P_f , W	EFF , %
1.0	0.09	5.25	46.15	10.38
2.0	0.35	10.25	47.68	18.19
3.0	0.78	15.25	49.20	24.57
4.0	1.37	20.25	50.77	29.86
5.0	2.13	25.25	52.37	34.33
6.0	3.05	30.25	53.99	38.15
7.0	4.14	35.25	55.63	41.45
8.0	5.40	40.25	57.30	44.34
9.0	6.83	45.25	59.00	46.88
10.0	8.42	50.25	60.72	49.14
20.0	34.34	101.50	79.85	62.98
30.0	76.51	151.50	100.97	69.31

The discussion of the results. When determining the energy efficiency coefficient of the high-voltage installation, let us consider the power $P_{out} = P_{LV} + P_i$ as a net power, while the power P_f represents the additional power losses in the filter resistance. At the same time, an increase in the resistance of the filter R_f is a means of decreasing the amplitude of the voltage ripple in the installation load when increasing voltage U_m at the input of the circuit [5].

The peculiarity of developing a mathematical model for the typical high-voltage installation modes (Fig. 1) is that it determines the necessary parameters of the installation in the opposite direction – given average voltage drop across the group of Zener diodes U_0 for a given average current I_0 through it. The proposed solution sets the numerical value of the time instant t_1 – the start of the charging of the installation capacitor C_2 and the time instant t_2 – the «disconnection» of the right part of the installation from the capacitance C_1 , and also determines the parameters $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, p_1, p_2, p_3, p_4, \psi, \Delta u_s, U_m$ depending on the values of $U_0, I_0, C_1, C_2, C_3, R_{LV}, T, r, R_d, R_f$ by the analytical method, and is new.

The use of Zener diodes in the measuring group of a high-voltage direct current installation allows significantly reducing the pulsation amplitude (up to 3 and more times) and improve the voltage quality on the load [8].

It should also be noted that nowadays professional and demonstration versions of various circuit simulation programs are widely used to simulate voltage multiplication schemes, as well as processes in electrical equipment insulation. To simulate, for example, the phenomenon of partial discharges in the insulation of high-voltage equipment, demonstration versions of the programs are sufficient enough [15, 16]. However, the number of Zener diodes in the operating DETU 08-04-99 installation is tens of thousands of pieces. In this regard, on the one hand, a complete simulation of such a scheme requires expensive professional circuit simulation programs. On the other hand, as shown in this article, there is no need for a detailed circuit simulation of such a complex scheme. Taking these factors into account, the group of authors made a choice in favor of a generalized analytical solution of the problem posed in this article.

Conclusion.

1. An analytical method for solving equations for a complex system of a typical high voltage direct current installation based on a voltage doubler rectifier with an integrated R, C – filter, and a measuring group has been developed.

2. The solution obtained is generalized for the case of insertion of Zener diodes into the measuring group, while it is valid within the linearized domain of their current-voltage characteristic.

3. The use of Zener diodes in the load circuits of the installation makes it possible to significantly reduce the amplitude of voltage ripple, and also to improve the quality of the output voltage of direct current voltage multiplier.

4. A theoretical basis is developed not only for voltages and currents, but also for the electrical power of the elements of a typical high-voltage direct current installation with allowance for nonlinear voltage pulsations.

REFERENCES

- Dwivedi C.K., Daigavane M.B. Multi-purpose low cost DC high voltage generator (60 kV output), using Cockcroft-Walton voltage multiplier circuit. *International Journal of Science and Technology Education Research*, 2011, vol.2(7), pp. 109-119.
- Cortez D.F., Barbi I. A Family of High Voltage Gain Single-Phase Hybrid Switched-Capacitor PFC Rectifiers. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 2015, vol.30, no.8, pp. 4189-4198. doi: 10.1109/TPEL.2014.2360173.
- Cockroft J.D., Walton E.T.S. Experiments with high velocity positive ions. (I) Further developments in the method of obtaining high velocity positive ions. *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, physical and engineering sciences*, 1932, vol.136, no.830, pp. 619-630. doi: 10.1098/rspa.1932.0107.
- Golomedov A.V. *Poluprovodnikovye pribory. Diody vvpriamitel'nye, stabilitrony, tiristory: spravochnik* [Semiconductors. Rectifier diodes, Zener diodes, thyristors. Directory]. Moscow, Radio and communication Publ., 1988. 347-350. (Rus).
- Brzhezzytskiy V.O., Vendychanskiy R.V., Desiatov O.M., Haran I.A. Rationale diodes and modes of supply of standard units of high voltage direct current. *Science news of NTUU «KPI»*, 2014, no.1, pp. 7-13. (Ukr).
- Brzhezzytskiy V., Desiatov O., Suleimanov V., Khominich V. Analysis of high-voltage cascade generator pulsations of a direct current. *Technology audit and production reserves*, 2015, vol.1, no.1(21), pp. 56-61. doi:10.15587/2312-8372.2015.37219. (Ukr).

7. Brzhezitsky V., Desiatov O., Maslychenko I., Anokhin Y. Analytical research mode the voltage of high-voltage cascade generator with nonlinear loads. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 2015, vol.21, no.3, pp. 183-191. (Ukr).
8. Brzhezitsky V., Desyatov O., Garan J., Babicheva A. Analysis of the current ripple of cascade generator high DC voltage. *Scientific Herald of NULES of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*, 2015, no.209-2, pp. 30-38. (Ukr).
9. Merev A., Hällström J.K. A Reference System for Measuring High-DC Voltage Based on Voltage References. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 2015, vol.64, no.1, pp. 184-189. doi: **10.1109/TIM.2014.2338673**.
10. Anokhin Y.L., Brzhezitskyi V.O., Haran Ya.O., Masliuchenko I.M., Protsenko O.P., Trotsenko Ye.O. Application of high voltage dividers for power quality indices measurement. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.6, pp. 53-59. doi: **10.20998/2074-272X.2017.6.08**.
11. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test devices with capacitive energy storage. *Electrical engineering & electromechanics*, 2007. no.6, pp. 70-75. (Rus).
12. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load for synthesis of discharge circuit of capacitor by time parameters. *Technical electrodyamics*, 2014, no.3, pp. 12-18. (Rus).
13. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors. *Technical electrodyamics*, 2015, no.4, pp. 3-11. (Rus).
14. DSTU 3863-99 *Derzhavnyi standart Ukrainy. Metrolohiia. Derzhavna povirochna skhema dlia zasobiv vymiriuvan elektrychnoi napruhy postiinoho strumu v diapazoni vid 1 do 800 kV* [DSTU 3863-99. State standard of Ukraine. Metrology. State verification schedule for means measuring of direct current electric voltage in the range from 1 to 800 kV]. Kyiv, Derzhstandart of Ukraine Publ., 1999. 10p. (Ukr).
15. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Simulation of partial discharges under influence of impulse voltage. *Technology audit and production reserves*, 2018, vol.1, no.1(39), pp. 36-41. doi: **10.15587/2312-8372.2018.123309**.
16. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges. *Technology audit and production reserves*, 2018, vol.2, no.1(40), pp. 37-44. doi: **10.15587/2312-8372.2018.126626**.

Received 30.08.2018

V.O. Brzhezitskyi¹, Doctor of Technical Science, Professor,
R.V. Vendychanskyi², Deputy Chief of the Research Department
of Measurements of Electrical Values,

Ye.O. Trotsenko¹, Candidate of Technical Science, Associate
Professor,

Ya.O. Haran¹, Assistant,

O.M. Desyatov¹, Engineer,

V.I. Khominich¹, Candidate of Technical Science, Senior
Researcher,

¹ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute»,

37, Prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine,

phone +380 44 2367989,

e-mail: v.brzhezitskiy@ukr.net

² State Enterprise «All-Ukrainian State Research and Production
Center For Standardization, Metrology, Certification and
Consumers Rights Protection» (SE «Ukrmetrteststandard»),

4, Metrolohichna Str., Kyiv, 03168, Ukraine,

phone +380 44 5263485

e-mail: hivolt@ukrcsm.kiev.ua

M. Dehghani, Z. Montazeri, A. Ehsanifar, A.R. Seifi, M.J. Ebadi, O.M. Grechko

PLANNING OF ENERGY CARRIERS BASED ON FINAL ENERGY CONSUMPTION USING DYNAMIC PROGRAMMING AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Purpose. In the present article, a new approach of the energy grid studies is introduced to program energy carriers. In this view, a proper plan is designed on the use of energy carriers considering the energy optimum use. Indeed, the proper energy grid is designed by applying Iran energy balance sheet information. It is proper to mention that, the energy grid modelling is done in a matrix form. The electrical energy distribution among power stations is achieved by using the particle swarm optimization algorithm. In the present paper, concerning the dynamic programming method, it is tried to determine a suitable combination of energy carriers. References 16, tables 17, figures 1.

Key words: particle swarm optimization, final energy consumption, energy planning, energy carriers, dynamic programming.

Цель. В настоящей статье предлагается новый подход к исследованию энергетических сетей для планирования энергоносителей. С этой целью разработан корректный план использования энергоносителей с учетом оптимального потребления энергии. Разработана соответствующая энергосистема с использованием информации о энергетическом балансе Ирана. Необходимо отметить, что моделирование энергосистемы выполняется в матричной форме. Распределение электрической энергии между электростанциями достигается за счет использования алгоритма оптимизации методом роя частиц. В настоящей работе, посвященной методу динамического программирования, предпринята попытка определить подходящую комбинацию энергоносителей. Библ. 16, табл. 17, рис. 1.

Ключевые слова: оптимизация методом роя частиц, конечное потребление энергии, планирование в энергетике, энергоносители, динамическое программирование.

Introduction. One of the suitable criterions in determining the development level and the life quality of a typical country is the energy application. Both the duration of energy presentation and the long term access ability to sources require energy comprehensive planning. One of the key issues of energy planning is energy carriers.

Despite the present applied method, the energy planning program needs the initial comprehensive study of the energy system. It is possible to offer a general framework to model different systems holding different energy carriers like electrical, thermal, gas, etc. energies. The mentioned modelling framework is based on the energy-based approach. The energy-based main idea is defining a converter matrix having the ability of describing the generation, delivery and consumption within systems carrying some types of energies [1]. Based on the energy current optimization model, Cormio has proposed a linear-based planning optimization model in a region in south of Italy. This plan includes energy optimization details of the energy initial sources, thermal and electrical energies generation, transition and the consumption section. The energy system optimization model is introduced in [2] from the final energy consumption level to the initial energy carriers that is from down to up.

The global energy system is mainly based on applying fossil fuels like coal, oil and natural gas. Although renewable energy sources are under focused, their reliable ability is low. Considering the lack of fossil sources, transition to renewable energy sources by applying hydrogen as the energy carrier is introduced [3]. This economic transition includes uncertainty and it is simultaneously introduced by the greenhouse gases effects. By applying long-term planning, this energy substitution is investigated and it is highly tried to supply proper hydrogen or the energy carrier assessment in the future [4].

While renewable energies are introduced as the energy initial carriers, the transportation industry is highly dependent to oil energy carrier. Indeed, there is no simple renewable solution to answer the transition section demand. Today, biofuels along with electricity is introduced as a main planning choice in replacing the transportation fossil fuels [5].

Concerning the micro grid concept, the random energy planning is introduced by taking the renewable energy sources uncertainty and its oscillation entity. Renewable energy sources which are known as initial energy carriers are integral parts of a micro grid. The oscillatory entity of these sources makes a micro grid exploiting complex [6].

The common initial energy sources (the fossil fuels) are limited and they need to be programmed considering the renewable initial energy carriers. Considering the planning present limitations, four dimensions known as system, application, generation and technology terms can be discussed. Indeed, the generation and exploiting initial energy sources can be studied by considering the new energy industry properties [7]. Accordingly, different energy carriers are studied regarding their application efficiency and abilities. Thus, energy carriers exploiting is optimally done [8].

Different studies have been proposed by researchers within the field of energy planning and management. Therefore, in none of these studies, an hourly exploiting of these energy carriers to supply the final energy consumption is not investigated. In the present article, the ultimate effort is done to exploit energy carriers by neglecting energy carriers' independency. To implement this planning, the proper energy grid is designed.

In the following, in section two, the present problem is introduced. Then, in section three, the energy grid modelling is analyzed. The particle swarm algorithm is introduced in section four. Designing the proper energy

grid to be used in energy studies is done in section five. Section six simulates planning. Finally, discussion and conclusion are studied in section seven.

Problem presentation. In planning energy initial carriers, the lowest energy level that is the final energy application is considered as the first level; then, different energy losses and their converting are analyzed step by step to determine the quantity of initial energy carriers in order to supply the final energy consumption.

An important portion of the final energy use is related to the electrical energy. In each hour of planning, different modes of power stations can supply the consumption of electrical energy. For each mode, the best economic distribution among power stations must be determined. Therefore, in each hour considering different modes of power stations' combination, there are different modes of energy carriers. Indeed, we are facing the power station commitment problem. The only difference is that instead of having different combinations of power stations, we face with energy carriers different combinations. Considering the study period and the grid information, the proper combination is chosen by taking the study period length into account.

The energy grid modelling. After compiling and expanding the notion of the referent energy system in the Brochain national laboratory, the energy system simulator is developed. The matrix formulation main concept is to cut the energy system vertically [9].

The energy grid matrix model starts from the lowest energy level or the final energy consumption. Then, it reaches the highest energy level or the initial energy carriers.

At first, the final energy consumption matrix is defined as V_1 matrix based on different sections. In this case, there is

$$V_2 = T_{1,2} \times V_1, \quad (1)$$

where V_2 is the final energy consumption based on different carriers and $T_{1,2}$ is the consumption part to carriers converter part.

Considering the energy consumption, distribution and transition losses, the final energy consumption is defined as

$$V_3 = T_{2,3} \times V_2, \quad (2)$$

where V_3 is the final energy consumption based on different carriers considering losses, $T_{2,3}$, is the transition, distribution and consumption efficiency matrix.

To model the final electrical energy consumption, the electrical supply shares of different power stations are calculated by applying (3); then, the power stations input fuels are measured by (4)

$$V_{e2} = T_{e1,2} \times V_{e1}, \quad (3)$$

$$V_{e3} = T_{e2,3} \times V_{e2}, \quad (4)$$

where V_{e1} is the total generated electrical energy, $T_{e1,2}$ stands for the separation matrix of the electrical energy generation at different power stations, V_{e2} is the electrical energy generation of different power stations, V_{e3} is different power stations input fuel and $T_{e2,3}$ is the power stations efficiency matrix.

Besides, to compute the electrical energy generator carriers (5) is used

$$V_{e4} = T_{e3,4} \times V_{e3}, \quad (5)$$

where V_{e4} is the electrical energy generator vectors and $T_{e3,4}$ is the power stations' input fuel separated from different vectors input fuel matrix.

After simulating the electrical energy generation process, the need for different vectors is computed by considering the electrical energy generation

$$V_4 = V_3 + V_{e4} - V_e, \quad (6)$$

where V_4 stands for the need for different vectors considering the consumption, distribution and transition losses of electrical energy generation, and V_e is the generated electrical energy.

Some of these carriers are derived from refining process. Therefore, it is necessary to simulate the petroleum refinery; thus, (7) is used

$$V_{p2} = T_p \times V_{p1}, \quad (7)$$

where V_{p1} is the refineries maximum capacity, T_p is the share of each generated products of the petroleum refinement, and V_{p2} shows the carriers generated by refinement.

By using (8), the need for carriers can be computed considering refinement

$$V_5 = V_4 - V_{p2} + V_p, \quad (8)$$

where V_p is the refined petroleum and V_5 shows the need for carriers after considering the electrical energy generation losses and refinement.

Finally, the quantities of carriers' import and export are determined by applying

$$V_6 = V_5 - P, \quad (9)$$

where P is the national generation quantity of the initial energy carriers; V_6 is the initial energy carriers' import and export. Noticeably, the positive sign represents import and the negative sign shows the export.

In (3), in order to determine different power stations shares of the electrical energy generation, it is necessary to establish the economic distribution. To fulfill this aim, the particle swarm optimization is used.

The particle swarm optimization. The particle swarm optimization (PSO) was first introduced by Candy and Aberheart [10]. After then, it was used in different scientific and applied fields. PSO is a population based optimization algorithm in which each person is considered as a particle. These particles positions within the search space determine the problem solution. Particles can search the best position in cooperation with each other. Particles' movements can be determined by applying (10) and (11)

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t), \quad (10)$$

$$v_i(t+1) = wv_i + c_1r_1(pb_{est_i}(t) - x_i(t)) + c_2r_2(g_{best}(t) - x_i(t)), \quad (11)$$

where $x_i(t)$ is the position, $v_i(t)$ is the i -th particle velocity at t moment, $pb_{est_i}(t)$ is the best position found by the i -th particle, and $g_{best}(t)$ is the best found position by the whole population till t moment, w is the inertial coefficient, c_1 and c_2 are the controlling parameters of each particle and the whole population best effect on the particles velocity and r_1 and r_2 are random numbers within (1-0).

Designing the energy grid suitable for studies.

Since the present study is novel, information related to the proper energy grid is not accessible. Indeed, in this study, the energy grid comprising the 24-hour final energy consumption information is needed. Both Iran energy balance sheet information [11] and the standard electrical grid used in the power station commitment problem studies are used.

The idea of designing the proper energy grid is proposed based on the concept of the electrical energy vital role. Indeed, some part of the final energy consumption is related to the final electrical energy consumption. In the energy balance sheet, there is no information of the final energy use. However, it is clear that the final energy consumption of different energies is not independent of one another and the final energy consumption of different energies is symmetric.

Considering the energy balance sheet, the final energy consumption for a year is in Table 1.

Table 1
Different sections of the final energy consumption [11]

Row	Sectors of energy		
1	E1	Residential, commercial, general	399.9 mboe
2	E2	Industrial	188.2 mboe
3	E3	Transportation	254.3 mboe
4	E4	Agriculture	33.4 mboe
5	E5	Other	2.5 mboe
6	E6	Non-energy	85.3 mboe
7	E_{ef}	Total of final energy consumption	9636.6 mboe
8	E_{ef}	Final electrical energy consumption	79.7 mboe

The final electrical energy consumption in the above table is shown by E_{ef} . It is known that considering the electrical energy losses from generation till consumption (consumption, distribution and transition losses) of power stations must generate more electrical energies in order to supply this quantity.

Concerning the final energy consumption, the electrical final energy consumption in different power stations is calculated as below

$$E_{ef} = \sum_{i=1}^n a_i E_i, \quad (12)$$

$$E_{ef} = a_1 E_1 + a_2 E_2 + a_3 E_3 + a_4 E_4 + a_5 E_5 + a_6 E_6, \quad (13)$$

where E_{ef} is the final electrical energy consumption, n is the number of different energy consumption power stations, a_i is the electrical final energy consumption coefficient in the relation which is related to i -th final energy consumption, and E_i is the i -th section final energy consumption.

Considering losses of consumption, distribution and transition of electrical energy, its consumption is calculated by applying

$$E_e = \frac{1}{\eta_e} E_{ef}, \quad (14)$$

where E_e is the electrical energy consumption; η_e is the energy grid efficiency concerning losses of consumption, distribution and transition of electrical energy.

In the next phase of designing, it is possible to approximately compute the final energy per hour by applying information related to the power station commitment problem

$$V_1^h = \frac{load^n}{E_e} V, \quad (15)$$

where V_1^h is the designed final energy consumption, $load^n$ is the grid electrical energy quantity in h hour and V is the balance sheet based final energy consumption for the E_e electrical consumption quantity or E_{ef} electrical final energy consumption quantity.

Therefore, the 24-hour information of the final energy consumption is computed. Although, this final characteristic is approximately calculated and it might differ from the real value, this information answers our energy study.

The energy grid information and designing by applying ten power stations. In order to plan energies of initial energy carriers, a ten power station system is proposed. The electrical grid is derived from [12] reference. Information related to the mentioned system is designed based on the afore-said process. These data are attached to the same paper. The maximum power station capacities equals to 3721.1 boe. It is necessary to mention that quantities related to the power station capacity are chosen approximately and in accordance with the energy balance sheet.

Simulation. Regarding the energy grid modelling, the simulation trend can be represented as the followings:

- 1) defining parameters and converting matrices;
- 2) applying 3 to 10 steps for each hour of under studied 24 hour span;
- 3) determining the final energy consumption;
- 4) determining the final energy consumption based on different carriers;
- 5) determining the final energy consumption considering the energy, distribution, transition and consumption of energies;
- 6) determining possible combinations of power station generators in order to supply the electrical energy;
- 7) the economic distribution of the electrical energy among power station generators by means of the optimization algorithm for all possible combinations;
- 8) the contribution of each carrier from the refining of crude oil;
- 9) determine the need to provide energy to the final energy consumption for each of the possible combinations;
- 10) determining the import and export of energy carriers regarding the national energy carriers presentation for each possible combination;
- 11) determining the total request, import and export values of the energy carriers in the whole under studied span (24 hours) by means of the dynamic planning method.

The objective function. One important stage in planning energy carriers is to distribute electrical energy economically. The objective function of the electrical energy economical distribution is introduced in (16). This objective function can be solved using optimization algorithms [13]

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{N_{FIU}} E_{FIU}^i C_{FIU}^i + \sum_{i=1}^{N_{DU}} S_{U_i} C_C^i, \quad (16)$$

$$E_{FIU}^i = \sum_{j=1}^{N_{DU}} \sum_{k=1}^{N_{U_j}^i} e_{i,j} E_{IU}^k \quad \& \quad i=1:N_{FIU}, \quad (17)$$

$$e_{i,j} \in [ETF]_{N_{FIU} \times N_{DU}}, \quad (18)$$

$$E_{IU} = \frac{1}{\eta_U} E_{OU}, \quad (19)$$

where F_{obj} is the objective function, N_{FIU} is the number of different input fuels of power station generators, E_{FIU}^i is the sum of input energy to power stations of the i -th fuel type, C_{FIU}^i is the i -th type input fuel type cost of power stations, N_{DU} is the number of different fuel generators, S_{U_i} stands for the i -th power station on or off position, C_C^i is the i -th power station constant costs, N_U^j shows the number of j -th power station generators within the under studied energy grid, e_{ij} represents the i -th fuel share coefficient from the j -th power station energy input, ETF is the power station input energy matrix converting to fuels appropriate with different power stations, E_{IU} is the power station input energy matrix, η_U shows power stations efficiency vector and E_{OU} stands for power stations output electrical energy.

In the optimization algorithm, E_{OU} is the power stations generated electrical energy which is chosen as the problem variables. Optimization limitations are defined as below:

1) the load balance

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) = D(t); \quad (20)$$

2) the upper and lower unit generations

$$P_{\min}^i \leq P^i \leq P_{\max}^i \quad (21)$$

where N represents the number of units, $P_i(t)$ shows the i -th unit generated power at the t time, $D(t)$ is the value of electrical power request at t time, P_{\min}^i is the lower limit,

P^i manifests generation, and P_{\max}^i shows the i -th unit upper limit.

The dynamic planning application. After distributing the electrical energy in each hour of planning that is done in appropriation with each possible energy division among power stations, the planning trend continues'; thus, energy carriers combinations parallel with power stations combinations are concluded. By applying the dynamic planning method, the proper strategy of energy carriers planning is determined along with the study.

At K hour with I combination, the retrospective algorithm of computing the minimum cost is defined as

$$F_{cost}(K, I) = \min_{\{L\}} [P_{cost}(K, I) + S_{cost}(K-1, L : K, I) + F_{cost}(K-1, L)], \quad (22)$$

where $F_{cost}(K, I)$ is the minimum total cost to arrive at the (K, I) mode, $P_{cost}(K, I)$ is the (K, I) mode cost and $S_{cost}(K-1, L : K, I)$ shows the transition cost from $(K-1, L)$ to (K, I) mode. The (K, I) mode is the I combination at K hour [14].

The energy grid simulation with ten power stations.

The final energy consumption based planning of energy carriers designed with ten power stations is implemented. The dynamic planning is done by saving paths equal with the number of each study hour maximum modes and its results are shown in Table 2.

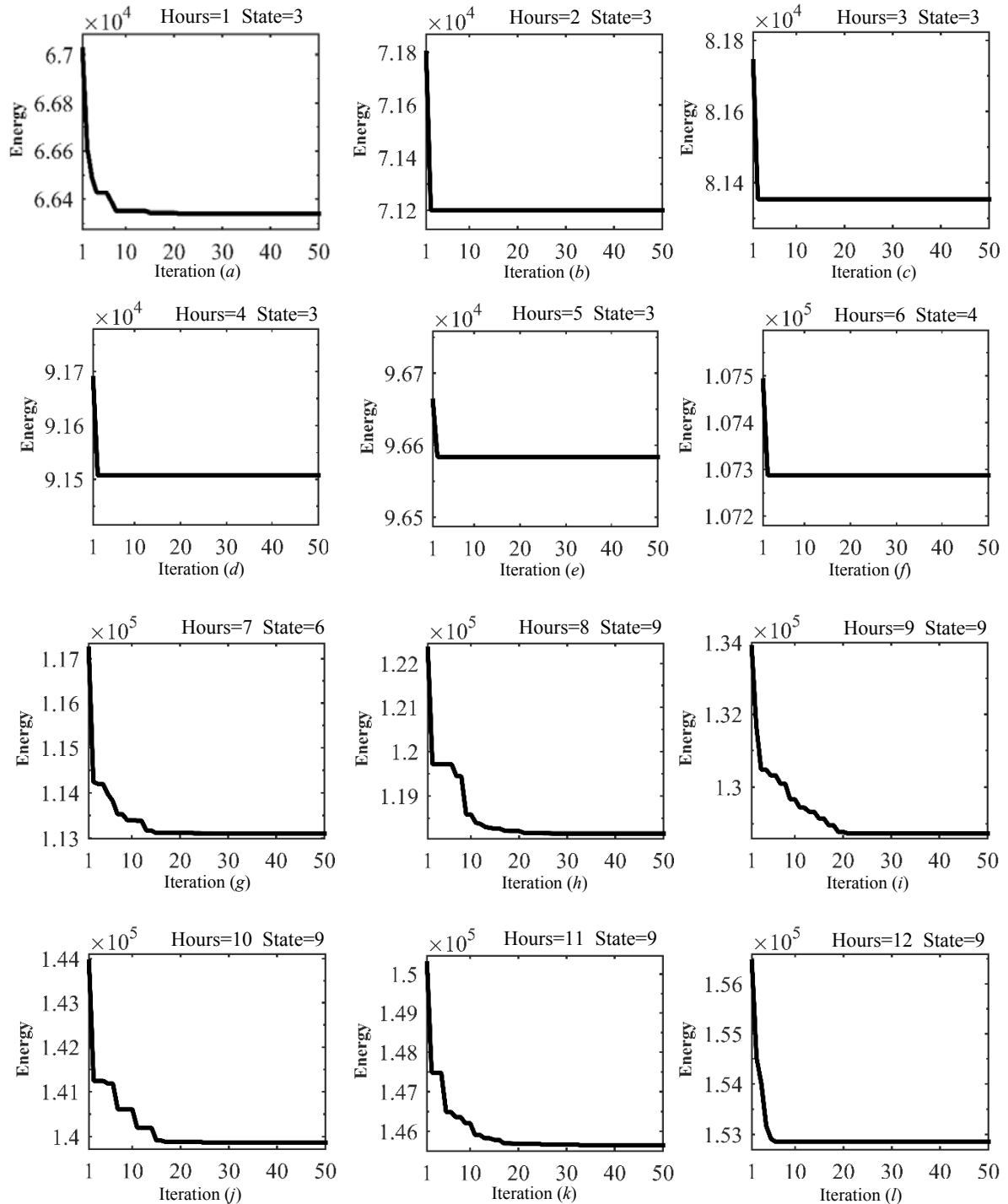
Table 3 holds the need for energy carriers in order to provide final energy consumption. The need for energy carriers of the total study period is determined in Table 4. The economical distribution of electrical energy among units is represented in Table 5. The optimization algorithms access trend to the economical distribution of the electrical energy is depicted in Fig. 1. Besides, considering the quantity of energy carriers national representation, the value of carriers import and export quantities are listed in Table 6.

Table 2
The output of dynamic planning in ten unit energy grids by means of PSO

Strategy						Hour
S6	S5	S4	S3	S2	S1	
2	2	2	2	2	2	The initial state
3	3	3	3	3	3	1
3	3	3	3	3	3	2
3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	4
3	3	3	3	3	3	5
4	4	4	4	4	4	6
4	4	4	4	4	4	7
9	9	9	9	9	9	8
9	9	9	9	9	9	9
9	9	9	9	9	9	10
10	10	10	10	10	10	11
10	10	10	10	10	10	12
10	10	10	10	10	10	13
9	9	9	9	9	9	14
9	9	9	9	9	9	15
9	9	9	9	9	9	16
9	9	9	9	9	9	17
9	9	9	9	9	9	18
9	9	9	9	9	9	19
9	9	9	9	9	9	20
9	9	4	4	4	4	21
9	6	4	4	3	3	22
7	6	4	4	3	3	23
7	6	5	4	3	2	24
8557932	8557192	8557153	8554502	8554182	8555398	Cost (dollar)

Table 6

Import and export of carriers			
Import	Export	Carrier	Row
0	163006	Petroleum	1
1000.893	0	Liquid gas	2
0	9132.05	Fuel oil	3
0	1916.25	Gas oil	4
0	121.508	Kerosene	5
8322.891	0	Gasoline	6
1198.34	0	Plane fuel	7
2221.738	0	Natural gas	8
0	37.6261	Coke gas	9
367.8484	0	Coal	10



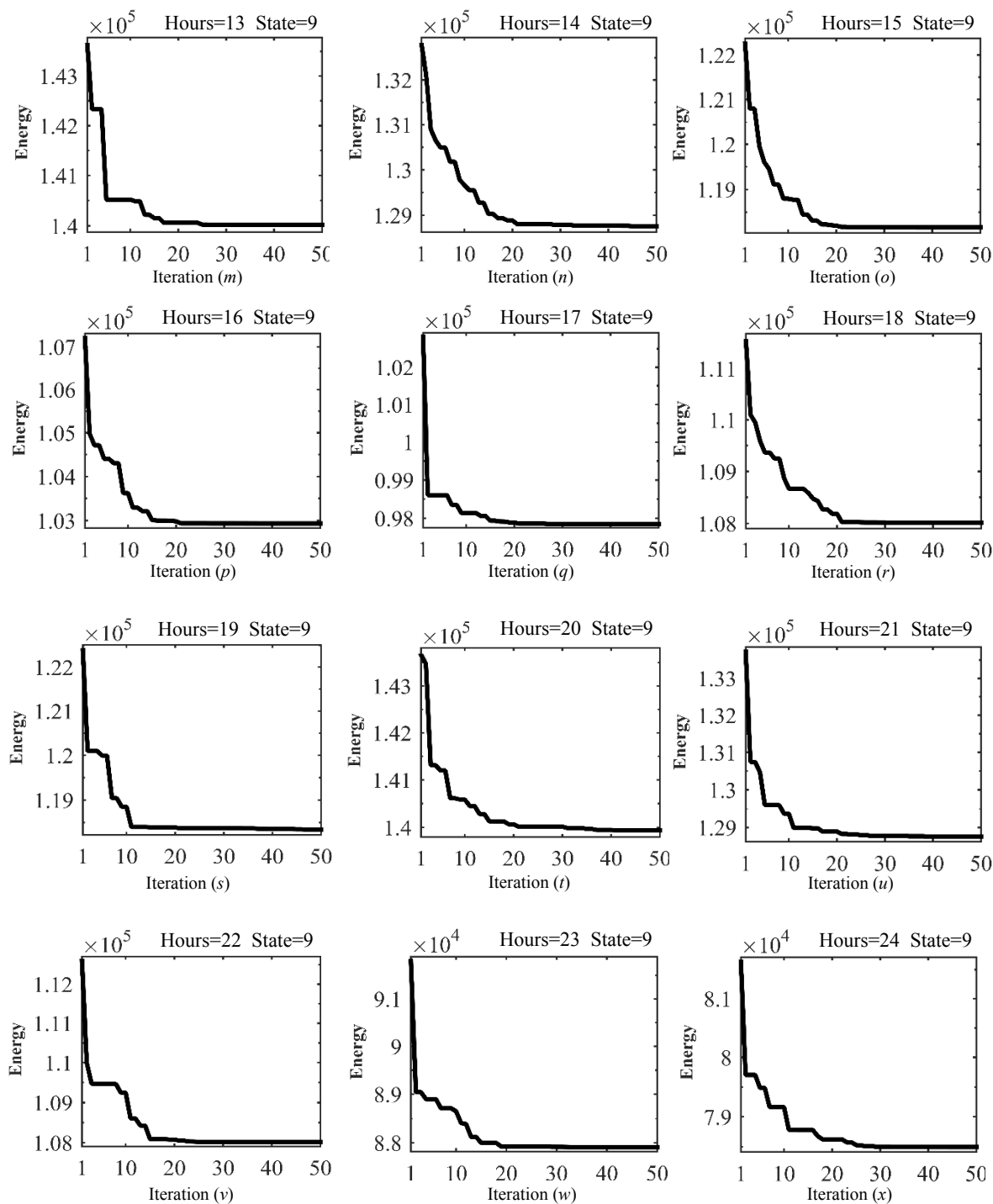


Fig. 1. The access trend to the electrical energy economical distribution\ within the energy grid by applying PSO

Discussion and conclusion. In the present article, a new approach in energy studies was introduced. In this view, the maximum effort was made to arrive at the suitable planning of energy carriers based on the final energy consumption. This planning was done such that it showed energy carriers beside each other as a system and neglected their planning independent view.

The energy grid modeling started from the lowest energy level of the final energy consumption and went to the highest level of the energy initial carriers step by step in a matrix shape. In this modelling, some factors like the

energy grid losses, the electrical energy distribution among units, and the petroleum refinement were taken into account. After a matrix form energy grid modelling, the energy grid was designed based on the 24 hour information of Iran energy balance sheet and the standard electrical grid since there was no available authentic information of energy grid.

In the proposed planning, the dynamic planning method and the particle swarm optimization algorithm were used. Indeed, particle swarm optimization algorithm was used along with the electrical energy economical

distribution; hence, the dynamic planning program was utilized in order to access the proper strategy of mixing energy carriers along with the study period.

The proposed planning done on the authentic-based designed energy grid was implemented and its results were represented.

REFERENCES

1. Krause T., Andersson G., Fröhlich K., Vaccaro A. Multiple-Energy Carriers: Modeling of Production, Delivery, and Consumption. *Proceedings of the IEEE*, 2011, vol.99, no.1, pp. 15-27. doi: 10.1109/jproc.2010.2083610.
2. Cormio C., Dicorato M., Minoia A., Trovato M. A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2003, vol.7, no.2, pp. 99-130. doi: 10.1016/s1364-0321(03)00004-2.
3. Barbir F. Transition to renewable energy systems with hydrogen as an energy carrier. *Energy*, 2009, vol.34, no.3, pp. 308-312. doi: 10.1016/j.energy.2008.07.007.
4. Amoo L.M., Fagbenle R.L. An integrated impact assessment of hydrogen as a future energy carrier in Nigeria's transportation, energy and power sectors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol.39, no.24, pp. 12409-12433. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.022.
5. Ridjan I., Mathiesen B.V., Connolly D., Duić N. The feasibility of synthetic fuels in renewable energy systems. *Energy*, 2013, vol.57, pp. 76-84. doi: 10.1016/j.energy.2013.01.046.
6. Su W., Wang J., Roh J. Stochastic Energy Scheduling in Microgrids With Intermittent Renewable Energy Resources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, vol.5, no.4, pp. 1876-1883. doi: 10.1109/tsg.2013.2280645.
7. Geng W., Ming Z., Lilin P., Ximei L., Bo L., Jinhui D. China's new energy development: Status, constraints and reforms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol.53, pp. 885-896. doi: 10.1016/j.rser.2015.09.054.
8. Trop P., Goricanec D. Comparisons between energy carriers' productions for exploiting renewable energy sources. *Energy*, 2016, vol.108, pp. 155-161. doi: 10.1016/j.energy.2015.07.033.
9. Belier M. E.A.C.a.K.C.H. *Interfuel substitution study-the role of electrification*. Brookhaven National Laboratory informal Rept. BNL 19522 (ESAG-17), November, 1974.
10. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. *Proceeding of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia. IEEE Service Center, Piscataway, 1995. pp. 1942-1948.

11. Available at: http://www.saba.org.ir/saba_content/media/image/2015/09/7811_orig.pdf (accessed 16 April 2016).

12. Ebrahimi J., Hosseinian S.H., Gharehpetian G.B. Unit Commitment Problem Solution Using Shuffled Frog Leaping Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, vol.26, no.2, pp. 573-581. doi: 10.1109/tpwrs.2010.2052639.
13. Dehghani M., Montazeri Z., Dehghani A., Seifi A.R. Spring search algorithm: A new meta-heuristic optimization algorithm inspired by Hooke's law. *2017 IEEE 4th International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)*. doi: 10.1109/kbei.2017.8324975.
14. Wood A.J., Wollenberg B.F. *Power generation, operation, and control*. John Wiley & Sons, 2012.
15. IEA Publications, rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, Printed in France by STEDI, September 2004.
16. U.S. Energy Information Administration (EIA). Available at: <http://www.eia.gov> (accessed 21 July 2015).

Received 14.06.2018

M. Dehghani¹, Candidate of Power Engineering, M.Sc.,
Z. Montazeri², Candidate of Power Engineering, M.Sc. Student,
A. Ehsanifar¹, Candidate of Power Engineering, M.Sc.,
A.R. Seifi¹, Doctor of Power Engineering, Professor,
M.J. Ebadi³, Doctor of Applied Mathematics, Assistant Professor,
O.M. Grechko⁴, Candidate of Technical Science, Associate Professor,

¹ Department of Power and Control, Shiraz University, Shiraz, I.R. Iran,

e-mail: adanbax@gmail.com, ali.ehsanifar2020@gmail.com, seifi@shirazu.ac.ir

² Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University of Marvdasht, Marvdasht, I.R. Iran,

e-mail: Z.montazeri2002@gmail.com

³ Faculty of Marine Science, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran,

e-mail: ebadi@cmu.ac.ir

⁴ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: a.m.grechko@gmail.com

Appendix (Tables A.1–A.11)

Table A.1. Unit Information

Row	Power plant	Capacity of unit (MW)		Efficiency	Constant cost	Priority
		Min	Max			
1	Thermal	150	455	0.368	1	1
2	Thermal	150	455	0.345	2	2
3	Combined Cycle	20	130	0.455	3	3
4	Thermal	20	130	0.317	4	4
5	Gas	25	162	0.3	5	5
6	Combined Cycle	20	80	0.47	6	6
7	Thermal	25	85	0.35	7	7
8	Thermal	10	55	0.35	8	8
9	Combined Cycle	10	55	0.5	9	9
10	Gas	10	55	0.25	10	10

Table A.2. The time information of energy networks

Row	Power plant	MUT	MDT	Cold start	Initial conditions
1	Thermal	8	8	5	8
2	Thermal	8	8	5	8
3	Combined Cycle	5	5	4	-5
4	Thermal	5	5	4	-5
5	Gas	6	6	4	-6
6	Combined Cycle	3	3	2	-3
7	Thermal	3	3	2	-3
8	Thermal	1	1	0	-1
9	Combined Cycle	1	1	0	-1
10	Gas	1	1	0	-1

Table A.3. The cost of setting up units

Row	Power plant	Hot start	Cold start
1	Thermal unit	4500	9000
2	Thermal unit	5000	10000
3	Combined Cycle unit	550	1100
4	Thermal unit	560	1120
5	Gas unit	900	1800
6	Combined Cycle unit	170	340
7	Thermal unit	260	520
8	Thermal unit	30	60
9	Combined Cycle unit	30	60
10	Gas unit	30	60

Table A.4. Matrix T_p

Petroleum	0
Liquid gas	0.032
Fuel oil	0.293
Gas oil	0.293
Kerosene	0.099
Gasoline	0.157
Plane fuel	0
Other products	0.058
Natural gas	0
Coke gas	0
Coal	0
Non-commercial fuels	0
Electricity(power)	0

Table A.5. Conversion matrix input energy to power plants

Power plant	Thermal unit	Combined Cycle unit	Gas unit
Fuel oil	0.254	0	0
Gas oil	0.003	0.082	0.166
Natural gas	0.743	0.918	0.834

Table A.6. Domestic supplies of energy carriers

Row	Energy carrier	Energy (boe)
1	Petroleum	10513
2	Liquid gas	0
3	Fuel oil	0
4	Gas oil	0
5	Kerosene	0
6	Gasoline	0
7	Plane fuel	0

8	Other products	0
9	Natural gas	4026.4
10	Coke gas	26.6
11	Coal	40
12	Non-commercial fuels	161
13	Electricity (power)	0

Table A.7. Heating value[15] and energy rates[16]

Energy carrier	Heating value	Energy rates
Petroleum	38.5 MJ/lit	48 dollar/boe
Liquid gas	46.15 MJ/kg	374 dollar/tonne
Fuel oil	42.18 MJ/kg	180 dollar/tonne
Gas oil	43.38 MJ/kg	350 dollar/tonne
Kerosene	43.32 MJ/kg	500 dollar/tonne
Gasoline	44.75 MJ/kg	450 dollar/tonne
Plane fuel	45.03 MJ/kg	555 dollar/tonne
Natural gas	39 MJ/m ³	237 dollar/1000m ³
Coke gas	16.9 MJ/kg	157 dollar/tonne
Coal	26.75 MJ/kg	61 dollar/tonne

Table A.8. Electrical load demand

Hour	1	2	3	4
Load	700	750	850	950
Hour	5	6	7	8
Load	1000	1100	1150	1200
Hour	9	10	11	12
Load	1300	1400	1450	1500
Hour	13	14	15	16
Load	1400	1300	1200	1050
Hour	17	18	19	20
Load	1000	1100	1200	1400
Hour	21	22	23	24
Load	1300	1100	900	800

Table A.9. Final energy consumption

Hour	1	2	3	4	5	6	7	8
Residential, commercial, general	1570.19	1682.347	1906.66	2130.973	2243.129	2467.442	2579.599	2691.755
Industrial	738.9593	791.7421	897.3078	1002.873	1055.656	1161.222	1214.005	1266.787
Transportation	998.4982	1069.819	1212.462	1355.105	1426.426	1569.069	1640.39	1711.711
Agriculture	131.1437	140.5111	159.2459	177.9807	187.3481	206.0829	215.4503	224.8177
Other	9.816144	10.5173	11.9196	13.32191	14.02306	15.42537	16.12652	16.82768
Non-energy	334.9268	358.8502	406.6969	454.5436	478.4669	526.3136	550.2369	574.1603
Hour	9	10	11	12	13	14	15	16
Residential, commercial, general	2916.068	3140.381	3252.537	3364.694	3140.381	2916.068	2691.755	2355.286
Industrial	1372.353	1477.919	1530.701	1583.484	1477.919	1372.353	1266.787	1108.439
Transportation	1854.354	1996.996	2068.318	2139.639	1996.996	1854.354	1711.711	1497.747
Agriculture	243.5526	262.2874	271.6548	281.0222	262.2874	243.5526	224.8177	196.7155
Other	18.22998	19.63229	20.33344	21.03459	19.63229	18.22998	16.82768	14.72422
Non-energy	622.007	669.8537	693.777	717.7004	669.8537	622.007	574.1603	502.3903
Hour	17	18	19	20	21	22	23	24
Residential, commercial, general	2243.129	2467.442	2691.755	3140.381	2916.068	2467.442	2018.816	1794.503
Industrial	1055.656	1161.222	1266.787	1477.919	1372.353	1161.222	950.0906	844.5249
Transportation	1426.426	1569.069	1711.711	1996.996	1854.354	1569.069	1283.783	1141.141
Agriculture	187.3481	206.0829	224.8177	262.2874	243.5526	206.0829	168.6133	149.8785
Other	14.02306	15.42537	16.82768	19.63229	18.22998	15.42537	12.62076	11.21845
Non-energy	478.4669	526.3136	574.1603	669.8537	622.007	526.3136	430.6202	382.7735

Table A.10. Matrix T12

	Residential and commercial	Industrial	Transportation	Agriculture	Other	Non-energy
Petroleum	0	0	0	0	0	0
Liquid gas	0.051	0.013	0.01	0	0	0
Fuel oil	0.023	0.212	0.014	0	0	0
Gas oil	0.055	0.087	0.363	0.689	0	0
Kerosene	0.141	0.002	0	0.018	0	0
Gasoline	0.002	0.002	0.573	0.003	0	0
Plane fuel	0	0	0.031	0	0	0
Other products	0	0	0	0	0	0.402
Natural gas	0.564	0.521	0.007	0	0	0.497
Coke gas	0	0.021	0	0	0	0
Coal	0.0003	0	0	0	0	0.101
Non-commercial fuels	0.064	0	0	0	0	0
Electricity(power)	0.102	0.142	0.0004	0.29	1	0

Table A.11. Matrix T23

Petroleum	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Liquid gas	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fuel oil	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gas oil	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kerosene	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Gasoline	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Plane fuel	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Other products	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Natural gas	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1601	0	0	0	0
Coke gas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Coal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Non-commercial fuels	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Electricity(power)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.3158

О.Ю. Глебов, Д.Г. Колиушко, Г.М. Колиушко, Е.П. Еремеева

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИЙ 330(220) КВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ

Мета. Метою статті є розробка основних положень методики проектування конструктивного виконання заземлювального пристрою підстанцій з відкритими розподільними пристроями 330 (220) кВ, яка спрямована на забезпечення електромагнітної сумісності вторинних кіл трансформаторів струму. Методика. Для проведення досліджень використовувалися положення теорії планування експериментів, теорія електричних кіл, математичне моделювання в пакеті Grounding 1.0 і Microsoft Excel. Результати. В ході проведення однофакторних експериментів отримані залежності опору заземлювального пристрою і напруги між розрахунковими точками від площі заземлюючих пристроїв, розміру чарунки сітки, периметра поперечного перерізу заземлювачів, еквівалентного питомого опору ґрунту, струму короткого замикання і конструктивного коефіцієнта. Показано, що опір заземлювального пристрою і напруга між розрахунковими точками практично не залежать від глибини розташування горизонтальних заземлювачів в діапазоні глибин від 0,4 м до 1,4 м. Наукова новизна. У роботі сформульовано три критерії проектування заземлюючих пристроїв підстанцій 330 (220) кВ, спрямовані на забезпечення електромагнітної сумісності вторинних кіл. Практичне значення. Сформульовано положення методики проектування заземлювального пристрою за критерієм запобігання помилкового спрацьовування релейних захистів в аварійних режимах. Бібл. 10, табл. 2, рис. 14.

Ключові слова: заземлюючий пристрій, підстанції, електромагнітна сумісність, вторинні кола, опір заземлювального пристрою.

Цель. Целью статьи является разработка основных положений методики проектирования конструктивного выполнения заземляющего устройства подстанций с открытыми распределительными устройствами 330(220) кВ, которая направлена на обеспечение электромагнитной совместимости вторичных цепей трансформаторов тока. Методика. Для проведения исследований использовались положения теории планирования экспериментов, теория электрических цепей, математическое моделирование в пакете Grounding 1.0 и Microsoft Excel. Результаты. В ходе проведения однофакторных экспериментов получены зависимости сопротивления заземляющего устройства и напряжения между расчетными точками от площади заземляющего устройства, размера ячейки сетки, периметра поперечного сечения заземлителей, эквивалентного удельного сопротивления ґрунта, тока короткого замыкания и конструктивного коэффициента. Показано, что сопротивление заземляющего устройства и напряжение между расчетными точками практически не зависят от глубины расположения горизонтальных заземлителей в диапазоне глубин от 0,4 м до 1,4 м. Научная новизна. В работе сформулированы три критерия проектирования заземляющих устройств подстанций 330(220) кВ, направленные на обеспечение электромагнитной совместимости вторичных цепей. Практическое значение. Сформулированы положения методики проектирования заземляющего устройства по критерию предотвращения ложного срабатывания релейных защит в аварийных режимах. Библ. 10, табл. 2, рис. 14.

Ключевые слова: заземляющее устройство, подстанции, электромагнитная совместимость, вторичные цепи, сопротивление заземляющего устройства.

Введение. В п. 1.7.59 ПУЭ:2017 [1] указано назначение заземляющего устройства (ЗУ) электроустановок: «...Заземлювальный пристрій, який використовують для заземлення електроустановок ..., протягом усього періоду експлуатації має відповідати всім вимогам до заземлення цих електроустановок: захисту людей від ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції, умовам режимів роботи мереж, захисту електрообладнання від перенапруги, електромагнітної сумісності технічних засобів, які застосовують у цих електроустановках (наприклад, комп'ютерних і мікропроцесорних систем тощо). У першу чергу слід дотримуватися вимог до захисного заземлення...». В этом пункте показано, что главной задачей ЗУ является обеспечение электробезопасности.

Для решения указанной задачи разработаны основные критерии проектирования ЗУ, которые изложены в соответствующих пунктах [1]:

- 1) по допустимому значению сопротивления ЗУ;
- 2) по допустимому значению напряжения прикосновения;
- 3) по допустимому значению напряжения на ЗУ.

В ряде работ, например [2], рассмотрены направления реконструкции ЗУ для обеспечения электробезопасности.

Однако, помимо обеспечения электробезопасности, с помощью ЗУ должны решаться и другие важные задачи, перечисленные в п. 1.7.59 ПУЭ:2017, а именно обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств, применяемых в электроэнергетике. Указанный пункт является единственным пунктом в [1], где к ЗУ предъявляются требования по обеспечению ЭМС микропроцессорных технических средств (МП ТС), но далее по тексту документа эти требования (например, к конструктивному выполнению ЗУ) не конкретизированы.

В электроэнергетике Украины основными системообразующими элементами являются линии электропередачи и подстанции с распределительными 330(220) кВ и 750(500) кВ. Эти объекты относятся к электрическим сетям с заземлённой нейтралью, имеют большие токи замыкания на землю (до 50 кА) и представляют наибольшую опасность для персонала и

© О.Ю. Глебов, Д.Г. Колиушко, Г.М. Колиушко, Е.П. Еремеева

МП ТС в аварийных режимах. Наиболее широким классом релейных защит на подстанциях 330(220) кВ являются те, которые подключены к вторичным цепям трансформаторов тока (ТТ), например, максимальная или дифференциальная токовые защиты, направленные или не направленные и т.д. Поэтому обеспечение ЭМС именно токовых цепей является актуальной задачей для надежного функционирования подстанций.

Наиболее мощными источниками электромагнитных воздействий на подстанциях являются короткие замыкания на шинах, прямой удар молнии или срабатывание ограничителей перенапряжений и разрядников. Общей особенностью указанных воздействий является стекание больших токов в ЗУ, хотя амплитудно-временные параметры существенно различаются. Именно в этих режимах наиболее важную роль для надежного функционирования МП ТС играет конструктивное выполнение ЗУ. Однако, на сегодняшний день в нормативных документах по ЭМС [3] не сформулированы критерии проектирования ЗУ, а именно отсутствуют четкие требования к конструктивному выполнению ЗУ, которые позволяют обеспечить выполнение требований ЭМС первичных и вторичных цепей.

Целью работы является разработка методики проектирования конструктивного выполнения заземляющего устройства подстанций с распределительными 330(220) кВ, которая направлена на обеспечение электромагнитной совместимости токовых цепей.

Материалы исследования. Для решения поставленной задачи необходимо в первую очередь оценить значимость факторов, влияющих на основные нормированные параметры ЗУ. Для этого следует определить зависимость сопротивления ЗУ (R_G) и напряжения (U_C) между точками концевой заделки кабелей вторичных цепей ТТ от параметров ЗУ. Сопротивление ЗУ также определяет ещё одну нормированную величину – напряжение на ЗУ (U_G), которая представляет опасность для изоляции отходящих кабелей в аварийных режимах.

В работе [4] авторы показали, что напряжения помех во вторичных цепях ТТ определяются напряжением между двумя точками ЗУ, в которых выполнена концевая заделка кабеля вторичных цепей. Это напряжение определяется воздействующим током (КЗ или молнии). Ограничив это напряжение, можно предотвратить как пробой изоляции кабелей, так и ложное срабатывание релейных защит. Поэтому существующие критерии проектирования ЗУ необходимо дополнить следующими [5]:

1) предотвращение пробоя изоляции кабеля вторичных цепей высокочастотными (импульсными) напряжениями при стекании в ЗУ больших высокочастотных (импульсных) токов;

2) предотвращение пробоя изоляции кабеля вторичных цепей напряжениями промышленной частоты при стекании в ЗУ токов КЗ;

3) предотвращение ложного срабатывания релейных защит при КЗ от низкочастотных напряжений, если изоляции кабеля вторичных цепей все же повреждена.

Первый критерий сводится к уменьшению импульсных напряжений на ЗУ до значения, не превышающего предела прочности изоляции кабелей. Далее при проектировании ЗУ следует предусматривать такую конструкцию заземлителей вблизи ТТ и их клеммных шкафов, при которой сопротивление ЗУ импульсному току ($R_{G\ pulse}$) при КЗ на рассматриваемом оборудовании (или при ударе молнии в установленный рядом молниеотвод) не превышало бы допустимого значения (R_{PERM}), Ом:

$$R_{G\ pulse} \leq R_{PERM} = \frac{U_{PERM}}{I_{HF}}, \quad (1)$$

где U_{PERM} – максимальное значение напряжения, определяющее предел прочности изоляции кабеля к импульсным напряжениям нормированной формы, В; I_{HF} – максимальное значение импульсного тока при КЗ на шинах, (расчетное значение, характерное для распределительных устройств каждого класса напряжения), А.

Для случая удара молнии в установленный рядом молниеотвод, вместо тока I_{HF} следует принимать ток молнии $I_L = 100$ кА (или его часть при наличии нескольких путей стекания тока молнии в грунт).

В табл. 1 приведены параметры (максимальное значение I_{HF} , частота колебаний f_{HF}) высокочастотной составляющей тока КЗ на шинах открытых распределительных устройств (ОРУ) соответствующего класса напряжения (U_{nom}) [6]. Если отсутствуют данные о реальных пределах прочности изоляции контрольных кабелей к импульсным напряжениям, то U_{PERM} можно принять равным согласно [3] на уровне 1 кВ – для ОРУ-220 кВ и ниже, на уровне 2 кВ – для ОРУ-330 кВ и выше.

Таблица 1

Параметры ВЧ составляющей тока КЗ на шинах ОРУ

U_{nom} , кВ	110	220	330	500	750
I_{HF} , кА	1	2	6	8	12
f_{HF} , МГц	1,0	0,8	0,3	0,15	0,1
U_{PERM} , кВ	1	1	2	2	2
R_{PERM} , Ом	1,0	0,5	0,33	0,25	0,17

Второй критерий сводится к уменьшению (при КЗ на шинах подстанции) напряжений между точкой заземления клеммного ящика ТТ и точкой заземления панели релейной защиты (U_C) до испытательного напряжения ($U_{C,P}$), В:

$$U_C \leq U_{C,P} = 1000 \text{ В}. \quad (2)$$

Третий критерий направлен на уменьшение (при КЗ на шинах ОРУ) напряжений (U_C) до допустимого значения, обусловленного параметрами релейной защиты ($U_{C,relay}$), В:

$$U_C \leq U_{C,relay} = I_{relay} \cdot (Z_L + Z_{relay}), \quad (3)$$

где $U_{C,relay}$ – допустимое напряжение между точкой заземления клеммного шкафа ТТ и точкой заземления панели релейной защиты, В; I_{relay} – ток уставки срабатывания реле тока (пускового органа токовых защит) при КЗ на шинах, А; Z_L – сопротивление фазного проводника кабеля вторичных цепей ТТ, Ом; Z_{relay} – сопротивление катушки реле на промышленной частоте, Ом.

Наихудшим случаем для каждого распределительного устройства следует считать КЗ на том ТТ, у которого самый длинный кабель вторичных цепей, т.е. наиболее удаленный ТТ от здания, в котором установлены

Диапазон изменения влияющих факторов

Обозначение фактора	Значение фактора	
	минимальное	максимальное
$S_G \cdot 10^4, \text{ м}^2$	0,906352	9,251508
$b_G, \text{ м}$	7,03	30,4
$\rho_H, \text{ мм}$	31,4	172,0
$\rho_{EQ}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	1,69	249,67
$I_S, \text{ кА}$	2,43	42,961
k_ℓ	0,236	0,955
$t_H, \text{ м}$	0,5	2,0

релейные панели (ЗРП). Следовательно, при проектировании ЗУ необходимо выбирать такие конструктивные параметры сетки ЗУ, при которых напряжение U_C не превысит допустимого значения.

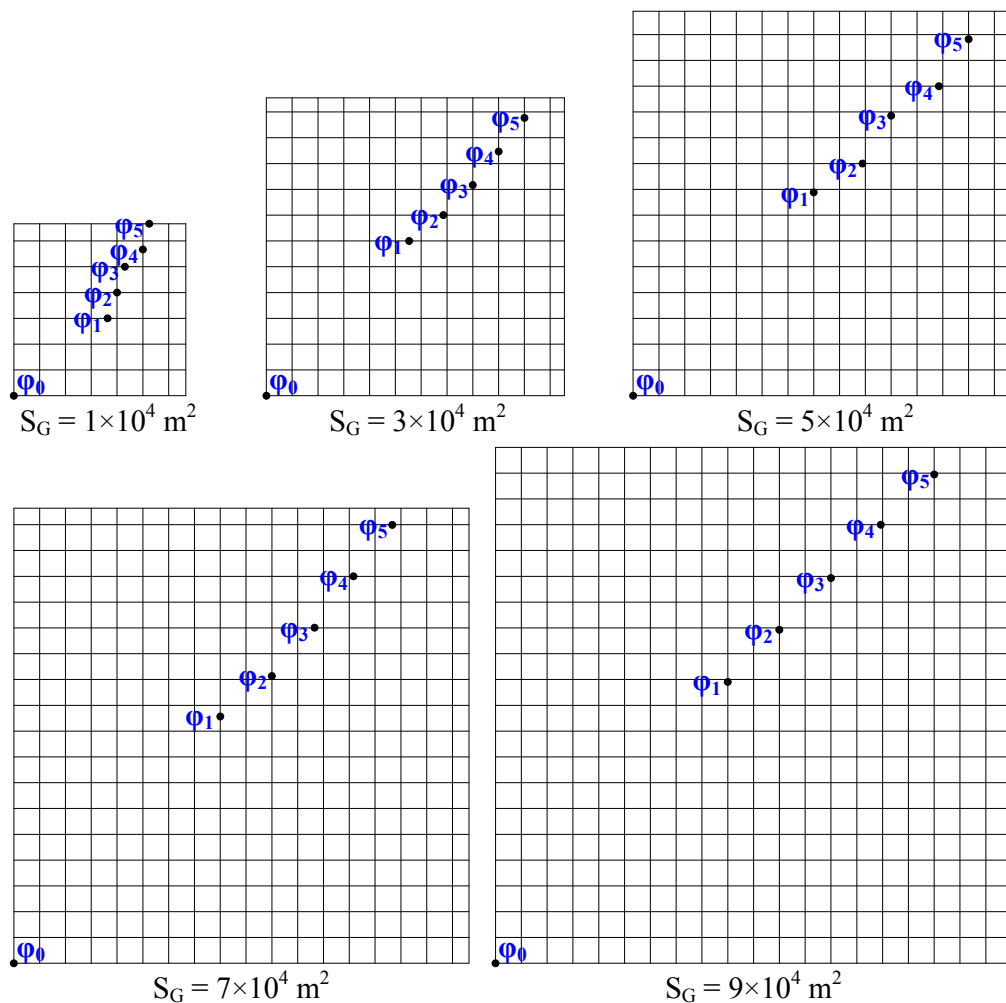
В работе [5] рассмотрено около 40 параметров, влияющих на напряжение U_C и сопротивление ЗУ подстанций 330(220) кВ. Многие из рассмотренных параметров являются взаимосвязанными. Однако, можно выделить семь независимых факторов:

- 1) площадь ЗУ (S_G);
- 2) размер ячейки сетки ЗУ (b_G);
- 3) периметр поперечного сечения горизонтальных заземлителей (ρ_H);
- 4) эквивалентное удельное сопротивление грунта (ρ_{EQ});
- 5) ток КЗ на шинах ОРУ (I_S);
- 6) конструктивный коэффициент соотношения длин (k_ℓ) – отношение расстояния от ТТ до ЗРП (ℓ_C) к диагонали ЗУ (D_G);
- 7) глубина расположения горизонтальных заземлителей (t_H).

Анализ экспериментальных данных, полученных при проведении диагностики ЗУ восьмидесяти подстанций 330(220) кВ, позволил определить реальный диапазон изменения перечисленных факторов (см. табл. 2).

На первом этапе исследований проводились однофакторные эксперименты для определения зависимостей искомых величин от каждого из независимых факторов. Для проведения таких экспериментов были составлены математические модели ЗУ, которые представляют собой квадратные равномерные сетки площадью $1 \cdot 10^4 \text{ м}^2$, $3 \cdot 10^4 \text{ м}^2$, $5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$, $7 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ и $9 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ с размерами ячейки сетки ЗУ 5 м, 15 м и 25 м.

На рис. 1 показаны сетки ЗУ с различной площадью и размером ячейки сетки 15 м, а также указано расположение точки КЗ (φ_0) и расчётных точек ($\varphi_1 - \varphi_5$), которым соответствуют различные места расположения здания ЗРП.

Рис. 1. Равномерные сетки ЗУ с размером ячейки сетки $b_G = 15 \text{ м}$

Расположение точки КЗ в углу сетки ЗУ является наихудшим случаем, что позволяет выполнить оценку искомых параметров «сверху», т.е. обеспечивает некоторый запас, позволяющий компенсировать старение изоляции кабелей и изменение параметров ЗУ в процессе эксплуатации.

Значения факторов принимались на уровне, близком к среднему значению из диапазонов, указанных в табл. 2: $S_G = 5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$; $b_G = 15 \text{ м}$; $p_H = 92 \text{ мм}$; $\rho_{EQ} = 80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $I_S = 21 \text{ кА}$; $k_\ell = 0,7$; $t_H = 0,7 \text{ м}$.

В ходе эксперимента определялись следующие параметры: сопротивление ЗУ (R_G); потенциал точки ввода тока КЗ φ_0 , и расчётных точек $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$, для которых значения конструктивного коэффициента k_ℓ составляли 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 соответственно. Напряжение $U_{C,i}$ определяется по формуле:

$$U_{C,i} = \varphi_0 - \varphi_i. \quad (4)$$

На рис. 2, 3 изображены графики зависимостей $R_G = f(S_G)$ и $U_C = f(S_G)$ соответственно. Зависимость $R_G = f(S_G)$ является убывающей, а зависимость $U_C = f(S_G)$ – возрастающей. При увеличении площади ЗУ в 9 раз сопротивление ЗУ уменьшается в 2,73 раз, а напряжение U_C увеличивается в 1,61 раз. Эти зависимости носят нелинейный характер, поэтому с достоверностью $R^2 = 1$ аппроксимируются полиномами четвертой степени. Аппроксимация зависимостей и определение её достоверности выполнялось в среде электронных таблиц Microsoft Excel. Поскольку зависимость $R_G = f(S_G)$ является нелинейной, то для получения линейных моделей при проведении многофакторного эксперимента область значений S_G целесообразно разделить на участки.

На рис. 4, 5 изображены графики зависимостей $R_G = f(b_G)$ и $U_C = f(b_G)$ соответственно. Обе зависимости являются возрастающими. При увеличении размера ячейки сетки ЗУ в 5 раз сопротивление ЗУ увеличивается в 1,16 раз, а напряжение U_C – в 2,56 раз. Эти зависимости носят линейный (или близкий к линейному для U_C) характер, поэтому с достоверностью не ниже $R^2 = 0,988$ аппроксимируются уравнениями прямой.

На рис. 6, 7 изображены графики зависимостей $R_G = f(p_H)$ и $U_C = f(p_H)$ соответственно. Обе зависимости являются убывающими. При увеличении периметра поперечного сечения горизонтальных заземлителей в 4,75 раз сопротивление ЗУ уменьшается в 1,28 раз, а напряжение U_C – в 4,94 раз. Эти зависимости носят нелинейный характер, но с достоверностью не ниже $R^2 = 0,86$ аппроксимируются уравнениями прямой.

На рис. 8, 9 изображены графики зависимостей $R_G = f(\rho_{EQ})$ и $U_C = f(\rho_{EQ})$ соответственно. Зависимость $R_G = f(\rho_{EQ})$ является возрастающей и носит практически линейный характер, поэтому с достоверностью не ниже $R^2 = 0,998$ аппроксимируется уравнением прямой. При увеличении эквивалентного удельного сопротивления грунта в 25 раз сопротивление ЗУ увеличивается в 13 раз. Зависимость $U_C = f(\rho_{EQ})$ является существенно нелинейной и имеет точку экстремума – максимум, поэтому область значений ρ_{EQ} следует разделить на участки. Границу раздела участков целесообразно принять при значении $\rho_{EQ} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. На каждом участке зависимость $U_C = f(\rho_{EQ})$ можно аппрок-

симировать уравнением прямой с достоверностью не ниже $R^2 = 0,94$.

Зависимость сопротивления ЗУ от тока КЗ на шинах ОРУ обусловлена нелинейной зависимостью продольного сопротивления ферромагнитных (стальных) заземлителей от амплитуды и частоты протекающего по ним тока, которая в свою очередь обусловлена зависимостью $\mu = f(H)$ магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряженности магнитного поля [10]. На рис. 10, 11 изображены графики зависимостей $R_G = f(I_S)$ и $U_C = f(I_S)$ соответственно. Анализ результатов, полученных для сеток ЗУ различной площади, показывает, что сопротивление ЗУ зависит от тока КЗ на шинах ОРУ лишь при токах менее 10 кА. Зависимость $R_G = f(I_S)$ является убывающей, а зависимость $U_C = f(I_S)$ – возрастающей. При увеличении тока КЗ на шинах ОРУ в 11 раз сопротивление ЗУ уменьшается в 1,11 раз, а напряжение U_C увеличивается в 19,32 раз. Зависимость $R_G = f(I_S)$ носит нелинейный характер, поэтому с достоверностью $R^2 = 1$ аппроксимируется полиномом четвертой степени. Зависимость $U_C = f(I_S)$ носит практически линейный характер, поэтому с достоверностью не ниже $R^2 = 0,999$ аппроксимируется уравнением прямой.

На рис. 12 изображён график зависимости $U_C = f(k_\ell)$, анализ которого показывает, что U_C существенно зависит от конструктивного коэффициента. Зависимость $U_C = f(k_\ell)$ является возрастающей. При увеличении коэффициента k_ℓ в 1,8 раз напряжение U_C увеличивается в 1,17 раз. Зависимость носит практически линейный характер, поэтому с достоверностью не ниже $R^2 = 0,98$ аппроксимируется уравнением прямой.

На рис. 13, 14 изображены графики зависимостей $R_G = f(t_H)$ и $U_C = f(t_H)$ соответственно, анализ которых показывает, что оба параметра практически не зависят от глубины расположения горизонтальных заземлителей в диапазоне глубин от 0,4 м до 1,4 м. Зависимость $R_G = f(t_H)$ является убывающей, а зависимость $U_C = f(t_H)$ – возрастающей. При увеличении глубины горизонтальных заземлителей в 3,5 раз сопротивление ЗУ уменьшается лишь на 1,74 %, а напряжение U_C увеличивается лишь на 3,58 %.

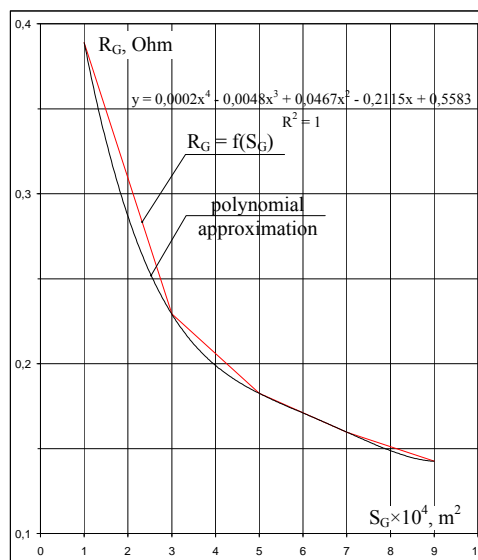


Рис. 2. Зависимость $R_G = f(S_G)$

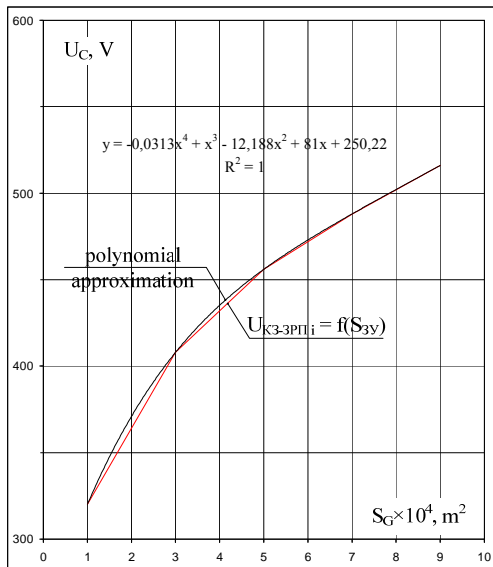


Рис. 3. Зависимость $U_C = f(S_G)$

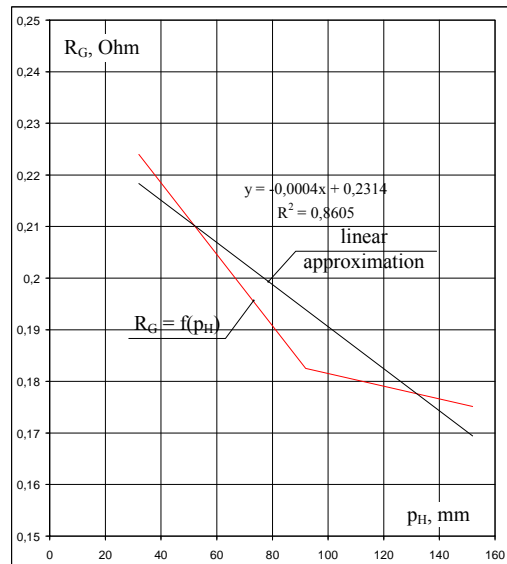


Рис. 6. Зависимость $R_G = f(\rho_H)$

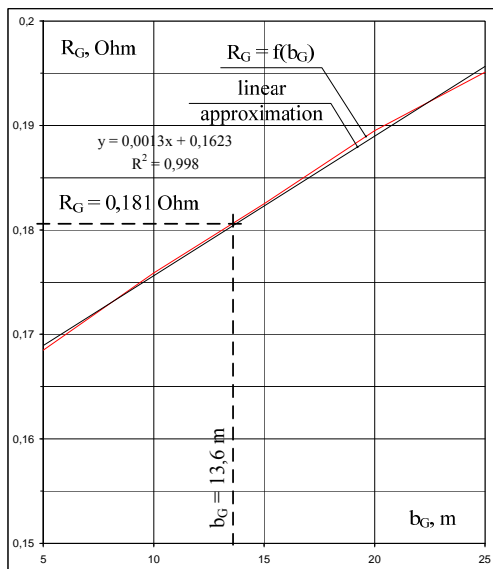


Рис. 4. Зависимость $R_G = f(b_G)$

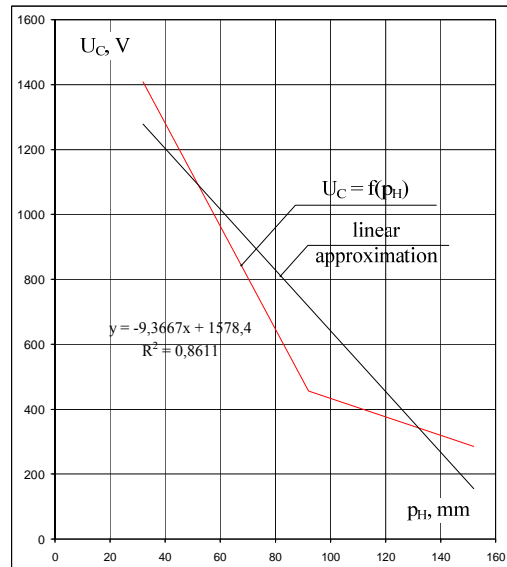


Рис. 7. Зависимость $U_C = f(\rho_H)$

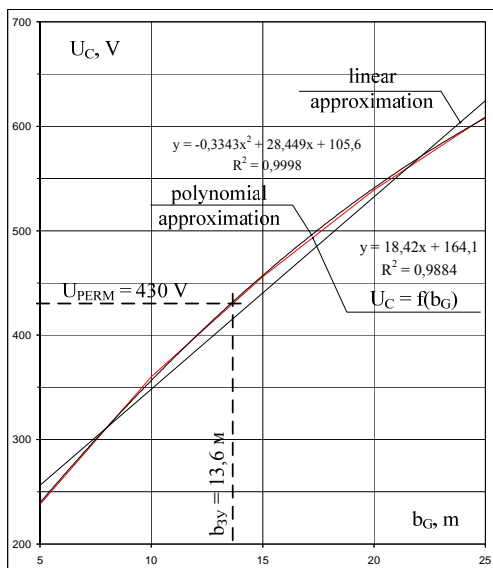


Рис. 5. Зависимость $U_C = f(b_G)$

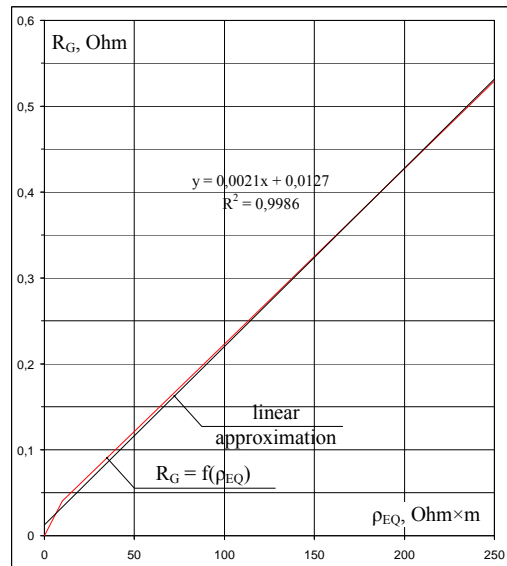


Рис. 8. Зависимость $R_G = f(\rho_{EQ})$

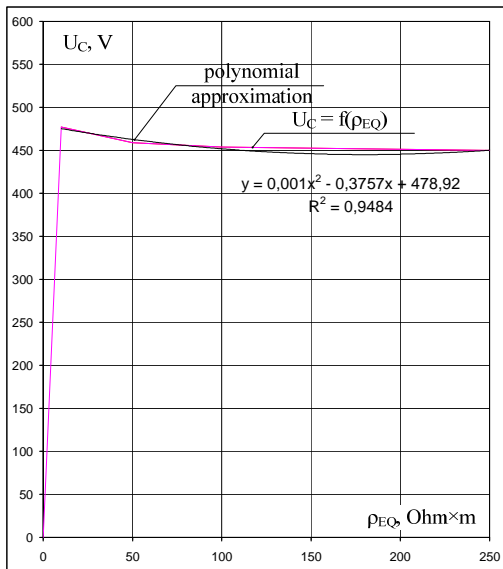


Рис. 9. Зависимость $U_C = f(\rho_{EQ})$

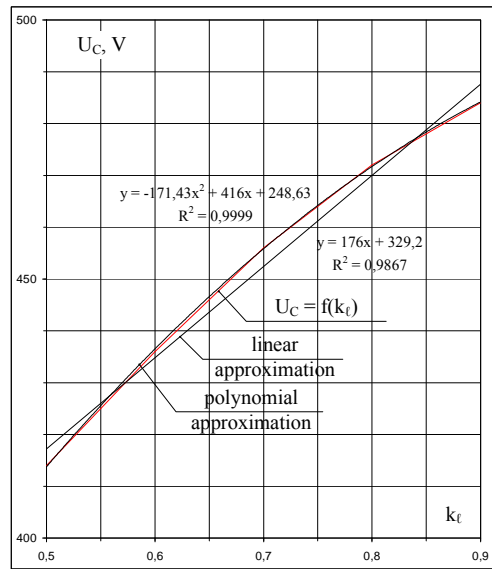


Рис. 12. Зависимость $U_C = f(k_t)$

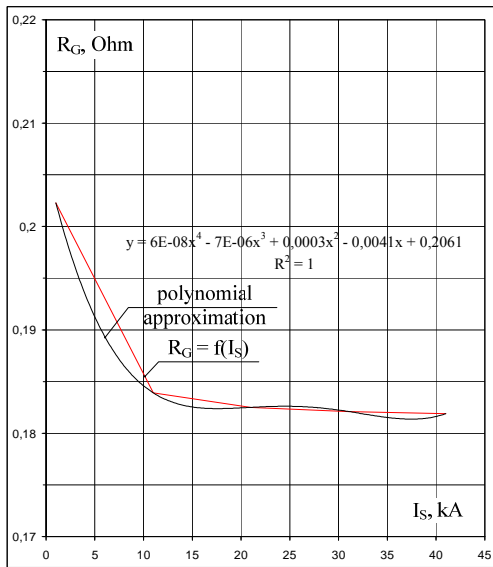


Рис. 10. Зависимость $R_G = f(I_s)$

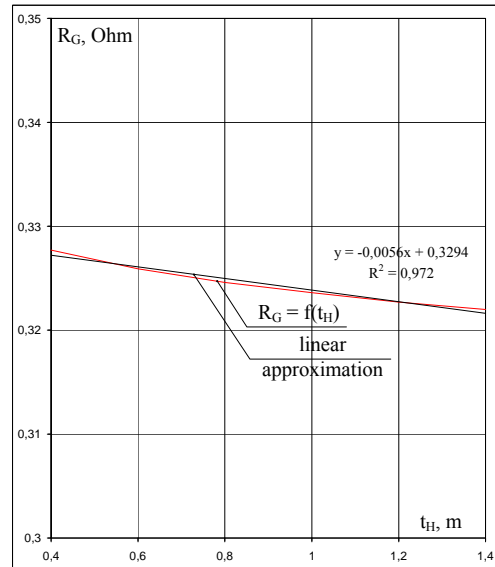


Рис. 13. Зависимость $R_G = f(t_H)$

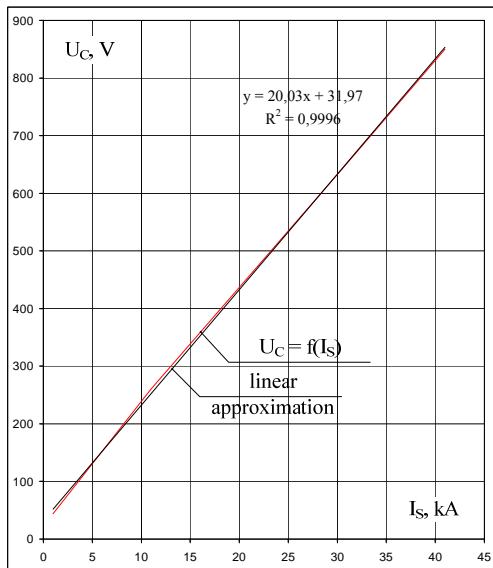


Рис. 11. Зависимость $U_C = f(I_s)$

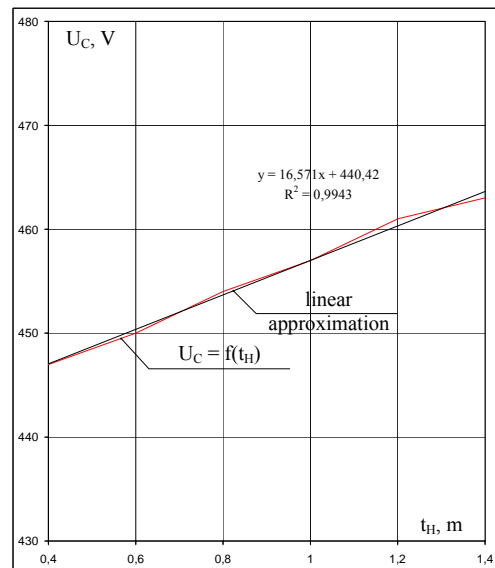


Рис. 14. Зависимость $U_C = f(t_H)$

На основании результатов проведенных исследований можно сформулировать основные положения методики проектирования конструктивного выполнения ЗУ подстанций с распределительными 330(220) кВ, которая направлена на обеспечение ЭМС токовых цепей:

- при проектировании ЗУ задаются исходными данными, которыми являются следующие параметры: S_G , ρ_{EQ} , I_S , k_ℓ , а также $U_{C,relay}$. Площадь ЗУ (S_G) определяется типом схемы первичных цепей и компоновкой распределительных устройств. Эквивалентное удельное сопротивление грунта (ρ_{EQ}) определяется параметрами геологической структуры грунта в месте расположения проектируемого ЗУ и определяется на этапе предпроектных изысканий. Ток КЗ на шинах ОРУ (I_S) определяется удаленностью подстанции от источников энергии. Конструктивный коэффициент (k_ℓ) определяется диагональю ЗУ и расстоянием от ТТ до здания ЗРП. Напряжение U_{PERM} определяется параметрами релейных защит (марка и длина кабеля токовых цепей и тип реле тока);

- далее необходимо определить размер ячейки сетки ЗУ (b_G) и периметр поперечного сечения горизонтальных заземлителей (p_H). Для этого необходимо построить графики зависимости $U_C = f(S_G, b_G, p_H, \rho_{EQ}, I_S, k_\ell)$ по заданным значениям S_G , ρ_{EQ} , I_S , k_ℓ при вариации b_G , приняв p_H из стандартного ряда стального проката (например, полоса 6×40 мм², у которой $p_H = 92$ мм). Построив график, определяем размер ячейки сетки ЗУ из условия $U_C \leq U_{C,relay}$. Так, например, для рассмотренного в работе набора факторов при $U_{C,relay} = 430$ В (см. рис. 5) размер ячейки сетки не должен превышать $b_G \leq 13,6$ м;

- затем необходимо определить R_G по заданным значениям параметров S_G , ρ_{EQ} , I_S и полученным значениям параметров b_G и p_H , подставив их в зависимость $R_G = f(S_G, b_G, p_H, \rho_{EQ}, I_S)$. Так, например, для рассмотренного в работе набора факторов и полученных значений $p_H = 92$ мм и $b_G = 13,6$ м, сопротивление R_G составит 0,181 Ом (см. рис. 4);

- далее следует определить напряжение на ЗУ ($U_G = I_S \cdot R_G$) по заданному значению I_S и полученному значению R_G . Так, например, для заданного тока КЗ на шинах ОРУ $I_S = 21$ кА и полученного значения $R_G = 0,181$ Ом, напряжение U_G составит 3801 В, что не превышает допустимого значения (см. п. 1.7.104 и п. 1.7.105 ПУЭ:2017), равного 5000 В;

- если напряжение на ЗУ окажется больше допустимого значения, то следует уменьшить значение b_G и/или увеличить значение p_H , после чего выполнить перерасчет значений R_G и U_G ;

- значения параметров S_G , b_G и p_H следует использовать для составления графической части проекта ЗУ и расчета стоимости горизонтальных заземлителей.

Выводы.

1. В работе предложено дополнить существующую методику проектирования ЗУ подстанций 330(220 кВ) ещё тремя критериями, направленными на обеспечение электромагнитной совместимости токовых цепей:

- предотвращение пробоя изоляции кабелей токовых цепей импульсными напряжениями при КЗ на шинах ОРУ или ударах молнии;

- предотвращение пробоя изоляции кабелей токовых цепей напряжениями промышленной частоты при КЗ на шинах ОРУ;

- предотвращение ложного срабатывания релейных защит от низкочастотных напряжений при КЗ на шинах ОРУ.

2. В работе проведены однофакторные эксперименты и получены зависимости сопротивления ЗУ и напряжения между расчётными точками от семи факторов: площадь ЗУ (S_G); размер ячейки сетки ЗУ (b_G); периметр поперечного сечения горизонтальных заземлителей (p_H); эквивалентное удельное сопротивление грунта (ρ_{EQ}); ток КЗ на шинах ОРУ (I_S); конструктивный коэффициент (k_ℓ); глубина расположения горизонтальных заземлителей (t_H). Показано следующее:

- зависимости $R_G = f(S_G)$, $R_G = f(p_H)$, $U_C = f(p_H)$, $R_G = f(I_S)$, $R_G = f(t_H)$ являются убывающими, а зависимости $U_C = f(S_G)$, $R_G = f(b_G)$, $U_C = f(b_G)$, $R_G = f(\rho_{EQ})$, $U_C = f(I_S)$, $U_C = f(k_\ell)$, $U_C = f(t_H)$ – возрастающими;

- зависимости $R_G = f(S_G)$, $U_C = f(S_G)$, $R_G = f(I_S)$ носят нелинейный характер, поэтому аппроксимируются полиномами четвертой степени;

- зависимости $R_G = f(b_G)$ и $U_C = f(b_G)$, $R_G = f(p_H)$, $U_C = f(p_H)$, $R_G = f(\rho_{EQ})$, $U_C = f(I_S)$, $U_C = f(k_\ell)$, $R_G = f(t_H)$, $U_C = f(t_H)$ носят линейный (или близкий к линейному) характер, поэтому аппроксимируются уравнениями прямой;

- зависимость $U_C = f(\rho_{EQ})$ является нелинейной и имеет точку экстремума – максимум, поэтому область значений ρ_{EQ} следует разделить на участки, на каждом из которых зависимость $U_C = f(\rho_{EQ})$ можно аппроксимировать уравнением прямой;

- параметры R_G и U_C пренебрежимо мало зависят от t_H в рассмотренном диапазоне глубин от 0,4 м до 1,4 м.

3. В работе сформулированы основные положения методики проектирования ЗУ с равномерной сеткой по критерию предотвращения ложного срабатывания релейных защит с примером её использования.

4. Для создания инженерной методики проектирования конструктивного выполнения ЗУ, которая направлена на обеспечение ЭМС токовых цепей, в дальнейших исследованиях необходимо провести многофакторные эксперименты с целью определения зависимости сопротивления ЗУ и напряжения U_C от параметров S_G , b_G , p_H , ρ_{EQ} , I_S , k_ℓ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міністерство енергетики України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
2. Руденко С.С., Коліушко Д.Г., Кашеев О.В. Визначення напрямку реконструкції заземлювального пристрою // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №2. – С. 57-61. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.09.
3. IEC/TS 61000-6-5 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-5: Generic standards – Immunity for power station and substation environments.
4. Воронина З.А., Глебов О.Ю., Колиушко Г.М. Определение уровней электромагнитных помех в кабелях трансформаторов тока при коротком замыкании на шинах подстанции с целью обеспечения электромагнитной совместимости // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. – №16. – С. 44-59.

5. Забезпечення енергетичної безпеки України шляхом підвищення надійності роботи стратегічних енергооб'єктів в нормальному та аварійних режимах. Звіт про НДР (промисловий, № держреєстрації 0117U000534) / Керівник М.І. Баранов. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017.
6. СТО 56947007-29.240.044-2010. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2010. – 147 с.
7. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
8. Колюшко Д.Г. Интерфейс программного комплекса для расчета заземляющих устройств электроэнергообъектов // Вісник НТУ «ХПІ». – 2007. – №34. – С. 71-79.
9. Линк И.Ю., Колюшко Д.Г., Колюшко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте // Электронное моделирование. – 2003. – Т.25. – №2. – С. 99-111.
10. Найфельд Н.Р. Заземление, защитные меры электробезопасности. Изд.4-е. – М.: Энергия, 1971. – 312 с.

REFERENCES

1. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok* [Electrical installation regulations]. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).
2. Rudenko S.S., Koliushko D.G., Kashcheyev O.V. Determination of direction to reconstruction of grounding system. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.2, pp. 57-61. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.09.
3. IEC/TS 61000-6-5 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-5: Generic standards – Immunity for power station and substation environments.
4. Voronina Z.A., Glebov O.Yu., Koliushko G.M. Determination of the levels of electromagnetic interference in the cables of current transformers with short-circuit on substation buses in order to ensure electromagnetic compatibility. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2011, no.16, pp. 44-59. (Rus).
5. Baranov M.I. *Zabezpechennya enerhetychnoyi bezpeky Ukrayiny shlyakhom pidvyshchennya nadiynosti roboty stratehichnykh enerhoobyektiv v normalnomu ta avariynnykh rezhymakh. Zvit pro NDR (promislyv; № derzhreystratsiyi 0117U000534)* [Ukraine's energy security by increasing the reliability of the operation of strategic energy facilities in normal and emergency modes. Report on research work. State registration no.0117U000534]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2017. (Ukr).
6. СТО 56947007-29.240.044-2010. *Metodicheskie ukazaniya po obespecheniju elektromagnitnoj sovmestimosti na ob'ektah elektros-etevogo hozjajstva* [Methodical instructions on ensuring electromagnetic compatibility on objects of electronetwork economy]. Moscow, JSC FGC UES Publ., 2010. 147 p. (Rus).
7. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. *Zazemlyayushchie ustroystva electroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).
8. Koliushko D.G. The interface of the program complex for Grounding system calculating of electric power objects. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2007, no.34, pp. 71-79. (Rus).
9. Link I.Yu., Koliushko D.G., Koliushko G.M. A mathematical model is not an equipotential ground grids substation placed in a double layer. *Electronic modeling*, 2003, vol.25, no.2, pp. 99-111. (Rus).
10. Nayfeld N.R. *Zazemleniye, zashchitnyye mery elektrobezopasnosti*. [Earthing, protective measures of electro-safety] Moscow, Energiya Publ., 1971. 312 p. (Rus).

Поступила (received) 11.07.2018

Глебов Олег Юрьевич¹,
 Колюшко Денис Георгиевич², к.т.н., с.н.с.,
 Колюшко Георгий Михайлович¹, к.т.н., с.н.с.,
 Еремеева Екатерина Петровна¹,

¹ НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
 тел/phone +380 57 7076671, e-mail: nio5_molniya @ukr.net

² Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +380 57 7076671, e-mail: nio5_molniya @ukr.net

O.Yu. Glebov¹, D.G. Koliushko², G.M. Koliushko³, E.P. Eremeeva⁴

¹ Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»
 National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

² National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

On the issue of design of grounding systems of 330(220) kV substations to ensure the electromagnetic compatibility of secondary circuits.

Purpose. The purpose of the work is to develop the fundamentals of the design methodology of grounding system design of substations with open switchgears 330 (220) kV, which is aimed at ensuring electromagnetic compatibility of secondary circuits of current transformers. **Methodology.** To carry out the research, the provisions of the theory of experiment planning, the theory of electrical circuits, mathematical modeling in the package Grounding 1.0 and Microsoft Excel were used.

Results. During the one-factor experiments, the dependencies of the grounding system resistance and the voltage between the calculated points on the grounding system area, the size of the grid cell, the perimeter of the grounding system horizontal electrodes cross-section, the equivalent soil resistivity, the short-circuit current and the design factor were obtained. It is shown that the grounding system resistance and the voltage between the calculated points are practically independent of the depth of the horizontal electrodes in the depth range from 0.4 m to 1.4 m. **Originality.** The paper formulated three criteria for grounding system designing of substations 330 (220) kV, aimed at ensuring electromagnetic compatibility of secondary circuits. **Practical value.** The fundamentals of the methodology for grounding system designing are formulated according to the criterion of preventing false triggering of relay protections in emergency modes. References 10, tables 2, figures 14.

Key words: grounding system, substations, electromagnetic compatibility, secondary circuits, grounding system resistance.

00008

Матеріали приймаються за адресою:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПИ", вул. Кирпичова, 21, м. Харків, 61002, Україна

Електронні варіанти матеріалів по e-mail: a.m.grechko@gmail.com

Довідки за телефонами: +38 050 653 49 82 Клименко Борис Володимирович

+38 067 359 46 96 Гречко Олександр Михайлович

